الدليل في الفيزياء

الكهرباء والضوء

الدكتور

ياسين محمد عبد السلام الحلواني

دار العلم والإيمان للنشر والتوزيع

دار الجديد للنشر والتوزيع

530.025

ا.ي

ياسين محمد عبد السلام الحلواني ، .

الدليل في الفيزياء:الكهرباء والضوء/ياسين محمد عبد السلام الحلواني.- ط1.-

دسوق: دار العلم والإيمان للنشر والتوزيع، دار الجديد للنشر والتوزيع

284 ص ؛ 17.5 × 24.5سم .

تدمك : 7- 623- 308 - 977 - 978

1. الفيزياء - أدلة

أ - العنوان .

رقم الإيداع : 28015.

الناشر : دار العلم والإيمان للنشر والتوزيع
دسوق - شارع الشركات- ميدان المحطة – بجوار البنك الأهلي المركز
E- elelm_aleman2016@hotmail.com & elelm_aleman@yahoo.com
mail:
الناشر : دار الجديد للنشر والتوزيع
تجزءة عزوز عبد الله رقم 71 زرالدة الجزائر
E-mail: dar_eldjadid@hotmail.com

2018

الفصل الأول
الكهرباء

مصطلحات تستخدم في الكهرباء

الإلكترون: جسيم تحت ذري يحمل شحنة كهربائية سالبة.

الأمبير: هو الوحدة المستخدمة في قياس معدل سريان التيار الكهربائي.

الأوم: هو الوحدة المستخدمة في قياس مقاومة مادة ما لسريان التيار الكهربائي.

الأيون: ذرة أو مجموعة ذرات اكتسبت إلكترونات أو فقدتها، واكتسبت بذلك شحنة كهربائية.

البروتون: جسيم تحت ذري يحمل شحنة كهربائية موجبة.

التيار الكهربائي: هو سريان الشحنات الكهربائية.

الدائرة الكهربائية: هي المسار الذي يتبعه التيار الكهربائي.

الشحنة الكهربائية: خاصية أساسية لجسيمات مادية معينة، تجعلها تجذب الجسيمات المشحونة الأخرى أو تتنافر معها.

العازل : مادة تقاوم سريان التيار الكهربائي.

الفولتية: نوع من "الضغط" يدفع الشحنات الكهربائية عبر دائرة.

القطب الكهربائي: قطعة من فلز أو أي موصل آخر يدخل عبره التيار إلى نبيطة كهربائية، أو يخرج منها.

الكهرباء الساكنة : هي الشحنة الكهربائية غير المتحركة.

الكهرومغنطيسية: قوة أساسية في الكون تشتمل على كل من الكهرباء والمغنطيسية.

الكيلواط-ساعة: هو كمية الطاقة الكهربائية التي تستهلكها نبيطة قدرتها 1,000 واط في ساعة واحدة.

المجال الكهربائي: هو تأثير الجسم المشحون على الحيز المحيط به، والذي يؤدي إلى اكتساب الأجسام المشحونة الأخرى في الحيز قوى كهربائية.

المقاومة: هو اعتراض مادة ما لسريان التيار الكهربائي.

الموصل: مادة يسري التيار الكهربائي عبرها بسهولة.

النيوترون: جسيم تحت ذري لا يحمل شحنة كهربائية.

الواط: هو الوحدة المستخدمة في قياس معدل استهلاك الطاقة، بما في ذلك الطاقة الكهربائية.

استخدامات الطاقة الكهربائية

تعتمد معظم مناحي حياتنا على الطاقة الكهربائية، حيث يستخدم سكان الدول الصناعية الكثير من النبائط التي تدار بالكهرباء كل يوم. ومن أهم هذه النبائط الحاسوب، الذي يستخدم الطاقة الكهربائية في معالجة المعلومات. فقد غيرت الحواسيب حياتنا داخل منازلنا ومدارسنا وأماكن أعمالنا.

الأجهزة المنزلية

في المنازل. توفر الأدوات الكهربائية مثل غاسلات الأطباق والمحامص والمكانس والغسالات الكهربائية الكثير من الوقت والجهد. وتساعد أجهزة الطبخ الكهربائية وأفران المايكرويف ومعالجات الطعام في تحضير الوجبات بسرعة وسهولة، كما تحفظ الثلاجات والمجمِّدات الطعام. وتبرِّد المكيفات والمراوح الكهربائية منازلنا، بينما توفر السخانات الكهربائية الدفء والماء الساخن. ويتيح التلفاز والراديو وألعاب الفيديو وحاكيات القرص المدمج ومسجلات شريط الفيديو فرص التسلية. ويمكننا الضوء الكهربائي من الاستفادة من ساعات الليل.

أنبوب انسياق لمعُجل جُسيمات

في الصناعة. لولا الكهرباء لما كان للصناعة الحديثة وجود. فالمصانع تنتج الكثير من المنتجات على خطوط التجميع، باستخدام الأحزمة الناقلة التي تعمل بالكهرباء والمعدات الكهربائية. ويستخدم المصنعون الأجهزة الكهربائية لضبط أحجام المنتجات ونوعياتها. وتعمل المثقابات والمناشير والعديد من الأدوات الصغيرة بالطاقة الكهربائية. وتدير المحركات الكهربائية المصاعد والروافع وغيرها من المعدات الكبيرة.

كاميرا التلفاز

في الاتصالات. تعمل كل النبائط التي يستخدمها الناس في الاتصالات تقريبًا بالطاقة الكهربائية. فالهواتف والتلفازات والراديوهات وأجهزة الفاكس والمودمات الحاسوبية تعمل كلها بالطاقة الكهربائية. وتستخدم أقمار الاتصالات الطاقة الكهربائية التي تولدها نبائط تسمى الخلايا الشمسية، لنقل المعلومات إلى كل أنحاء العالم. والإشارات التلفازية والراديوية إشارات كهربائية جزئيًا، وكذلك الإشارات الهاتفية والحاسوبية والفاكسية، التي تنتقل عبر أسلاك أو جدائل رقيقة من الزجاج تسمى الألياف البصرية.

القطار الكهربائي :

في المواصلات. توفر الطاقة الكهربائية القدرة اللازمة لتحريك القطارات وعربات الترام التي تنقل ملايين الناس إلى أعمالهم ومنها إلى منازلهم. وتستخدم معظم السيارات الشرارة الكهربائية لقدح البترول الذي يوفر قدرة تشغيل المحرك. وتساعد النبائط الكهربائية في تقليل استهلاك المحركات البترولية للوقود وتلويثها للهواء. وتدار العديد من أجهزة الضبط في الطائرات والسفن بالكهرباء.

لحام السيارات بالربوت :

في الطب والعلوم. يستخدم العاملون في مجال العناية الصحية أجهزة كهربائية عديدة لفحص المرضى وإجراء الاختبارات الطبية. فأجهزة الأشعة السينية وأجهزة التصوير بالرنين المغنطيسي، على سبيل المثال، تمكن الأطباء من رؤية أجهزة الجسم الداخلية. وتسجل مرسمات كهربائية القلب الإشارات الكهربائية الدقيقة الصادرة عن القلب، مما يساعد الأطباء على تشخيص أمراض القلب.

ويستخدم العلماء في المجالات العلمية كافة النبائط الكهربائية في إجراء البحوث. فعلماء الأحياء الدقيقة، على سبيل المثال، يستخدمون جهازًا قويًا يسمى المجهر الإلكتروني المسحي لدراسة أسرار الخلايا الحية.

ويستخدم الفيزيائيون معجلات الجسيمات التي تدار بالكهرباء لفحص التركيب الداخلي للذرات. وتساعد التلسكوبات الضخمة التي تدار بالكهرباء الفلكيين في دراسة الكواكب والنجوم والمجرات.

الشحنة الكهربائية:

تتكون كل المواد في الكون، من جسم الإنسان إلى النجوم البعيدة، من نوعين من الجسيمات الدقيقة هما الإلكترونات والكواركات. وتكوِّن الكواركات بدورها جسيمات أكبر، تنقسم إلى نوعين هما البروتونات والنيوترونات. وللإلكترونات والكواركات خاصية تسمى الشحنة الكهربائية، حيث تحمل الإلكترونات نوعًا من الشحنات يسمى الشحنة السالبة، بينما تحمل الكواركات إما الشحنات السالبة أو النوع الآخر من الشحنات الذي يسمى الشحنة الموجبة. وتساوي الشحنة الموجبة على البروتون الشحنة السالبة على الإلكترون، وذلك لأن البروتون يحتوي على كواركين يحمل كل منهما ثلثي وحدة شحنة موجبة، وكوارك يحمل ثلث وحدة شحنة سالبة. أما النيوترون فيحتوي على كواركين يحمل كل منهما ثلث وحدة شحنة سالبة وكوارك يحمل ثلثي وحدة شحنة موجبة.

وتلغي الشحنات بعضها بعضًا لأن إجمالي الشحنة الموجبة على النيوترون يساوي إجمالي الشحنة السالبة. ولذلك يقال أن النيوترون متعادل كهربائيًا، أي لا يحمل شحنة كهربائية إجمالية.

والشحنات المتضادة، أو غير المتشابهة ـ السالبة والموجبة ـ تتجاذب، بينما تتنافر الشحنات المتشابهة ـ الموجبة والموجبة أو السالبة والسالبة. وتنتج قوة التجاذب أو التنافر بين الشحنات عن قوى غير مرئية تسمى المجالات الكهربائية، تحيط بكل جسيم مشحون. وبسبب وجود المجالات، تتجاذب الجسيمات المشحونة أو تتنافر، حتى عندما تكون غير متلامسة.

تتحول الذرة إلى أيون عندما تكتسب أو تفقد إلكترونًا، وتكتسب بذلك شحنة كهربائية. وتحتوي الذرة العادية (إلى اليسار) على عدد مساو من البروتونات الموجبة والإلكترونات السالبة. وإذا فقدت إلكترونًا (إلى اليمين) تتحول إلى أيون موجب الشحنة.

الذرات. تتحد الكواركات لتكوين البروتونات والنيوترونات. وتتحد البروتونات والنيوترونات بدروها مع الإلكترونات لتكوين الذرات. وفي الذرة تترابط النيوترونات والبروتونات لتكوين لب دقيق يسمى النواة.

وتجذب النواة الموجبة الشحنة في الذرة الإلكترونات السالبة الشحنة. والنواة موجبة الشحنة لأنها تحتوي على بروتونات، ولا تحتوي على إلكترونات. وتدور الإلكترونات السالبة حول النواة الموجبة فيما يشبه دوران الكواكب حول الشمس.

ولكل نوع من الذرات عدد مختلف من البروتونات. فالهيدروجين، على سبيل المثال، وهو أبسط الذرات، يحتوي على بروتون واحد في النواة، بينما تحتوي ذرة الأكسجين على 8 بروتونات، والحديد على 26 بروتونًا، واليورانيوم على 92 بروتونًا. وتحتوي الذرة عادة على عدد مساو من البروتونات والإلكترونات. ونتيجة لذلك، تلغي الشحنات السالبة للإلكترونات الشحنات الموجبة للبروتونات، وتصبح الذرة متعادلة كهربائيًا.

الأيونات. تفقد الذرة أو تكتسب أحيانًا إلكترونًا واحدًا أو أكثر. فإذا اكتسبت إلكترونًا تصبح الذرة سالبة الشحنة، بينما تصبح موجبة الشحنة إذا فقدت إلكترونًا. وتسمى الذرات التي تحمل شحنة كهربائية الأيونات. ومعظم الأيونات موجبة الشحنة، ولذلك تعني كلمة أيون، عندما تستخدم بمفردها، الذرة التي فقدت إلكترونًا واحدًا أو أكثر. وتتجاذب الأيونات الموجبة والسالبة، ويمكنها أن تتحد لتكوين المواد الصلبة.

فملح الطعام العادي، على سبيل المثال، يتكون من الصوديوم والكلور. وفيه تفقد كل ذرة من ذرات الصوديوم إلكترونًا لتكوين أيون صوديوم موجب. وتتلقى كل ذرة من ذرات الكلور هذا الإلكترون لتكوين أيون كلوريد سالب. وبسبب قوة الجذب الكهربائي بين الأيونات يكون ملح الطعام صلبًا، ودرجة انصهاره عالية.

الجزيئات. تتقاسم الذرات المتعادلة الإلكترونات مع غيرها من الذرات. وتكون الذرات التي تتقاسم الإلكترونات منجذبة بعضها نحو بعض. ويجعل هذا التجاذب الذرات مرتبطة بعضها ببعض لتكوين جزيئات. فعلى سبيل المثال، يمكن أن تتقاسم ذرتا هيدروجين الإلكترونات مع ذرة أكسجين لتكوين جزئ ماء. وتميل الإلكترونات إلى البقاء قرب ذرة الأكسجين معظم الوقت، مما يعطيها شحنة كهربائية سالبة. وتكتسب ذرتا الهيدروجين شحنتين موجبتين. وتمسك قوة الجذب الكهربائي بين هذه الذرات المشحونة جزئ الماء في حالة ترابط.

الكهرباء الساكنة. في بعض الأحيان يفقد عدد كبير من ذرات جسم ما الإلكترونات أو يكتسبها. وعندما يحدث مثل هذا الفقدان أو الاكتساب يكتسب الجسم كله شحنة كهربائية. ويصف مصطلح الكهرباء الساكنة الأوضاع التي تحمل فيها الأجسام شحنة كهربائية.

تحدث الكهرباء الساكنة، على سبيل المثال، عندما تفرك قميصك ببالون، حيث يسبب احتكاك البالون بالقميص انتقال الإلكترونات من القميص إلى البالون، مما يؤدي إلى اكتساب القميص لشحنة كلية موجبة، نظرًا لاحتوائها على عدد من البروتونات أكبر من الإلكترونات، واكتساب البالون لشحنة كلية سالبة لاحتوائها على إلكترونات زائدة. ولذلك يلتصق البالون بالقميص أو بأي سطح آخر مثل الجدار. ويشبه ذلك ما يحدث عندما تمشي فوق سجاد في يوم جاف، حيث يؤدي الاحتكاك بين حذائك والسجاد إلى انتقال الإلكترونات من جسمك إلى السجاد، معطيًا جسمك شحنة كهربائية موجبة. وعندما تلمس مقبض الباب أو أي جسم فلزي آخر، تقفز الإلكترونات من الجسم الفلزي إلى جسمك، وحينئذ قد تشاهد شرارة وتحس بصدمة خفيفة.

وينتج البرق عن الكهرباء الساكنة. فالعلماء يعتقدون أن قطرات المطر المحمولة في رياح السحب البرقية تكوِّن شحنات كهربائية، حيث تصبح أجزاء من السحاب مشحونة بشحنة موجبة، بينما تصبح أجزاء أخرى مشحونة بشحنة سالبة. وقد تقفز الشحنات بين أجزاء السحاب المختلفة، أو من السحاب إلى الأرض، مما يؤدي إلى توليد الشرارة الكهربائية الضخمة التي نسميها البرق.

وللكهرباء الساكنة استخدامات عديدة في المنازل والمؤسسات والمصانع. فأجهزة النسخ التي نراها في المكاتب، على سبيل المثال، ناسخات كهروستاتية، تصنع نسخًا من المادة المطبوعة أو المكتوبة بجذب جسيمات التونر (الحبر المسحوق) إلى الورقة الموجبة الشحنة. وتستخدم الكهرباء الساكنة أيضًا في المنظفات الهوائية المسماة المرسِّبات الكهروستاتية. فهذه النبائط تشحن جسيمات الغبار والدخان والبكتيريا وحبوب اللقاح في الهواء بشحنات كهربائية موجبة. وتنقي ألواح تجميع سالبة الشحنة الهواء بجذب هذه الجسيمات الموجبة الشحنة إلى داخل المنظف.

الموصلات والعوازل:

تنتقل الشحنات الكهربائية عبر بعض المواد بدرجة أفضل من انتقالها عبر مواد أخرى، حيث تنتقل بسهولة عبر مواد تسمى الموصلات. وتقاوم مواد تسمى العوازل انتقال الشحنات الكهربائية.

التيار الكهربائي في الفلزات :

الموصلات. تحتوي المواد الموصلة للكهرباء على جسيمات مشحونة تتحرك بحرية عبر المادة. وعند تطبيق شحنة كهربائية إضافية على الموصل تنتشر الجسيمات المشحونة على سطح المادة. والجسيمات الحرة في معظم الموصلات إلكترونات غير مرتبطة بالذرات، وأيونات في موصلات أخرى.

والفلزات موصلات جيدة لأنها تحتوي على عدد كبير من الإلكترونات الحرة، ولذلك تصنع معظم الأسلاك المستخدمة في نقل الطاقة الكهربائية من الفلزات، وخاصة النحاس. وبعض السوائل أيضًا موصلات. فالماء المالح، على سبيل المثال، موصل للكهرباء لأنه يحتوي على أيونات صوديوم وكلوريد حرة الحركة داخل السائل.

وبعض الغازات أيضًا موصلات. ففي حالة تسخين غاز ما إلى درجات عالية تتحرك ذراته بسرعة عالية تؤدي إلى تصادمها، بعضها ببعض، بشدة، مما يجعل الإلكترونات تنفلت منها، وعندئذ يتحول الغاز إلى نوع من الموصلات الكهربائية يسمى البلازما.

ومن أمثلة البلازما الغاز الساخن المتوهج داخل المصباح الفلوري، والغازات الساخنة التي تكوِّن الشمس والنجوم الأخرى.

وفي معظم الموصلات تتصادم الإلكترونات المتحركة مع الذرات باستمرار، وتفقد الطاقة، ولكنها تتحرك بحرية تامة، ولا تفقد أي طاقة، في بعض المواد التي تسمى الموصلات الفائقة. وتتطلب الموصلات الفائقة درجات منخفضة جدًا لتؤدي وظيفة توصيل الكهرباء، ولذلك يستخدم هذا النوع من الموصلات في بعض الحالات الخاصة، وقد يستخدم في المستقبل في صناعة المحركات ذات الكفاءة العالية والمولدات وخطوط القدرة.

العوازل. في العوازل تكون الإلكترونات مرتبطة بإحكام بذراتها،ولا تستطيع التحرك بحرية. وعند تطبيق شحنة كهربائية إضافية على العازل تبقى الشحنة في مكانها، ولا تتحرك عبر المادة. ومن أمثلة العوازل الزجاج والمطاط والبلاستيك والهواء العادي الجاف.

والعوازل مهمة في السلامة الكهربائية، حيث تصنع معظم الحبال الكهربائية من مادة موصلة مغطاة بمادة عازلة مثل المطاط أو البلاستيك. ويستطيع الشخص لمس الحبل المغطى بالمادة العازلة حتى في حالة اتصال الحبل بمأخذ التيار.

أشباه الموصلات.

توصل بعض المواد الشحنة الكهربائية أفضل من العوازل، ولكن ليس بمستوى الموصلات. وتسمى هذه المواد أشباه الموصلات، ومن أكثرها استخدامًا السليكون. وبإضافة كميات صغيرة من مواد أخرى إلى شبه الموصل يستطيع المهندسون ضبط قدرتها على توصيل الشحنة الكهربائية. وأشباه الموصلات مهمة في تشغيل الحواسيب والآلات الحاسبة وأجهزة الراديو والتلفاز وألعاب الفيديو ونبائط أخرى عديدة.

المقاومة. تعني اعتراض المادة لمرور الشحنات الكهربائية عبرها. وتحدث المقاومة عندما تصطدم الإلكترونات المتحركة في المادة بالذرات، وتطلق طاقة في شكل حرارة. والموصلات الجيدة، مثل النحاس، ضعيفة المقاومة، مقارنة بأشباه الموصلات، مثل السليكون. أما العوازل، مثل الزجاج والخشب، فذات مقاومة عالية جدًا، يصعب معها مرور الشحنات الكهربائية عبرها. ولا تشكل الموصلات الفائقة أي مقاومة لمرور الشحنات عبرها.

ولا تتوقف المقاومة على نوع المادة فحسب، بل على حجمها وشكلها أيضًا. فالسلك النحاسي الرقيق، على سبيل المثال، أكثر مقاومة من السلك السميك، والسلك الطويل أكثر مقاومة من السلك القصير. وقد تتفاوت مقاومة المادة أيضًا حسب درجة الحرارة.

التيار الكهربائي:

يسمى سريان الشحنة الكهربائية عبر موصل التيار الكهربائي تيارًا كهربائيًا. وترتبط الطاقة بسريان التيار. فعند مرور التيار عبر نبيطة كهربائية تحوَّل الطاقة الكهربائية إلى أشكال مفيدة. فهي مثلاً تحول إلى حرارة في جهاز الطبخ الكهربائي، وإلى ضوء في المصباح الكهربائي.

مصباح متوهِّج :

التيار المستمر والتيار المتناوب. يسمى التيار الذي يسري باستمرار في اتجاه واحد التيار المستمر، ومن أمثلته التيار الذي تنتجه البطارية. ويسري التيار أحيانًا إلى الأمام ثم إلى الخلف، مغيراً اتجاهه بسرعة، ويسمى هذا النوع من التيار التيار المتناوب، ومن أمثلته التيار الذي يسري إلى المنازل. ففي بعض الدول يغير تيار المنازل اتجاهه مائة مرة في الثانية، مكملاً بذلك 50 دورة كاملة. وفي دول أخرى يغير التيار اتجاهه 120 مرة في الثانية، مكملاً 60 دورة كاملة.

مصادر التيار. لا يحمل الموصل في حد ذاته أي تيار كهربائي، ولكن عند تطبيق شحنة موجبة على أحد طرفيه، وشحنة سالبة على طرفه الآخر، تسري شحنة كهربائية عبر الموصل. ولأن الشحنات المتضادة تتجاذب، يتحتم استخدام نوع من الطاقة للفصل بين الشحنات، وحصرها في طرفي الموصل. ويمكن الحصول على هذه الطاقة من التفاعلات الكيميائية أو الحركة أو ضوء الشمس أو الحرارة.

البطاريات. تنتج البطاريات الطاقة الكهربائية من التفاعلات الكيميائية. ولكل بطارية تركيبان يسميان القطبين، يصنع كل منهما من مادة مختلفة فاعلة كيميائيًا. وبين القطبين تحتوي البطارية على سائل (أو عجينة) موصل للتيار الكهربائي، يسمى الإلكتروليت، يساعد في إحداث تفاعل كيميائي عند كل قطب. ونتيجة للتفاعلات عند القطبين يكتسب أحد القطبين شحنة موجبة، بينما يكتسب القطب الآخر شحنة سالبة، وعندئذ يسري التيار الكهربائي من القطب الموجب، عبر الموصل، إلى القطب السالب.

والطرف المسطح في بطارية الكشاف الضوئي هو القطب السالب، بينما يتصل الطرف المزود بنتوء بالقطب الموجب. ويسري التيار عند وصل القطبين بسلك، حيث يمكن تحويل الطاقة الكهربائية إلى ضوء بإمرار التيار عبر مصباح كهربائي صغير. وتبقي التفاعلات الكيميائية في الإلكتروليت القطبين مشحونين بشحنتين متضادتين، وبذلك تحافظ على استمرار سريان التيار.

وفي النهاية تنفد الطاقة الكيميائية، وتصبح البطارية غير قادرة على إنتاج الطاقة الكهربائية. وتُلقى بعض البطاريات بعد استكمال طاقتها، ولكن بعضها يمكن إعادة شحنها بإمرار التيار الكهربائي عليها، وتسمى البطاريات القابلة للشحن.

المولدات. تغير المولدات الطاقة الميكانيكية إلى طاقة كهربائية. يحرك مصدر طاقة ميكانيكية في المولد ملفات سلكية بالقرب من مغنطيس لإنتاج تيار كهربائي، حيث يعمل المولد بمبدأ توليد تيار كهربائي في موصل بتحريك الموصل قرب مغنطيس. وتنتج معظم المولدات تيارًا متناوبًا.

توفر المولدات معظم الطاقة الكهربائية التي يستخدمها الناس. ففي السيارة، يدير المحرك مولدًا صغيراً يسمى المنوِّب، لإنتاج الطاقة الكهربائية اللازمة لإعادة شحن بطارية السيارة. وبإمكان مولد كبير في محطة قدرة كهربائية إنتاج طاقة كهربائية تكفي مدينة يقطنها مليونا شخص.

ويصل التيار الكهربائي الناتج عن المولد إلى المنازل والمصانع والمكاتب عبر شبكات ضخمة من خطوط القدرة الكهربائية.

الخلايا الشمسية. تحول الخلايا الشمسية، والتي تسمى أيضًا الخلايا الفولتية الضوئية، ضوء الشمس إلى طاقة كهربائية. وهي تمد معظم الأقمار الصناعية، وغيرها من المركبات الفضائية، وكذلك بعض الآلات الحاسبة، بالقدرة. وتصنع الخلايا الشمسية من أشباه الموصلات، وخاصة السليكون المعالج بطريقة خاصة، حيث تؤدي الطاقة المأخوذة من الشمس إلى انفصال الشحنات السالبة والموجبة في شبه الموصل، ومن ثم تسري الشحنات في موصل.

البلورات الكهروإجهادية. البلورة الكهروإجهادية معدن لافلزي يكتسب شحنة كهربائية على سطحه عند تمديده أو ضغطه. وتستخدم البلورات الكهروإجهادية في بعض الميكروفونات لتحويل الطاقة الصوتية إلى طاقة كهربائية تستخدم في أغراض التسجيل والبث الإذاعي. وتستخدم معظم أجهزة الطبخ الحديثة البلورات الكهروإجهادية لإنتاج الشرارة الكهربائية التي تشعل الغاز. وأكثر البلورات الكهروإجهادية استخدامًا الكوارتز.

الدوائر الكهربائية

الدائرة الكهربائية هي المسار الذي يتبعه التيار الكهربائي بين نبيطة مثل المصباح الضوئي ومصدر طاقة مثل البطارية. وعندما يكون المفتاح الكهربائي مفتوحًا تفصل فجوة بين الأسلاك الموصلة، ولا يستطيع التيار إكمال مساره.

لاستخدام الطاقة الكهربائية توصل النبيطة الكهربائية بمصدر الطاقة، ويبنى مسار مكتمل للتيار الكهربائي، ليسري من مصدر الطاقة إلى النبيطة، ثم يعود مرة أخرى إلى المصدر. ويسمى هذا المسار الدائرة الكهربائية.

الدائرة البسيطة. افترض أنك تريد أن تولد إضاءة في مصباح كهربائي صغير باستخدام بطارية. سوف لن يمر التيار الكهربائي إلا في حالة إيجاد دائرة كاملة لسريان التيار من البطارية إلى المصباح ومنه إلى البطارية. ولتكوين هذه الدائرة، صل المصباح بالطرف الموجب للبطارية بسلك، ثم صل الطرف السالب للبطارية أيضًا بالمصباح بسلك. سوف يسري التيار عندئذ من الطرف الموجب للبطارية، عبر المصباح، إلى الطرف السالب.

يوجد في داخل المصباح الكهربائي سلك يسمى الفتيلة، يصنع من مادة ذات مقاومة أعلى من مقاومة السلكين الموصلين بين المصباح والبطارية. وتصطدم الإلكترونات المكونة للتيار بذرات الفتيلة، وتطلق معظم طاقاتها. وتسخن هذه الطاقة الفتيلة، التي تتوهج وتبعث الضوء.

الدوائر المتوالية والدوائر المتوازية. توفر البطارية أو المولد القدرة عادة لأكثر من نبيطة كهربائية. وفي مثل هذه الحالات تستخدم تصاميم دوائر تسمى الدوائر المتوالية والدوائر المتوازية. وللدائرة المتوالية مسار واحد، حيث يسري نفس التيار عبر كل أجزاء المسار وكل النبائط الكهربائية الموصلة إليه. وتستخدم الدوائر المتوالية في الكشافات الضوئية وبعض أضواء شجرة عيد الميلاد ونبائط أخرى بسيطة. وفي الدوائر المتوازية ينقسم التيار ليسري عبر مسارين أو أكثر. وتمكن هذه الدوائر مصدر الطاقة من مد نبائط كهربائية كثيرة بالتيار، مقارنة بالدوائر المتوالية. ولذلك توصل المصابيح والأجهزة الكهربائية في المنازل على التوازي.

وتحتوي معظم الدوائر الكهربائية على كلا نوعي الدوائر، كما تحتوي بعض الدوائر المعقدة جدًا، مثل دوائر الحاسوب أو التلفاز، على ملايين الأجزاء الموصلة بتوليفات متنوعة من الدوائر المتوالية والدوائر المتوازية.

المجالات الكهربائية والمغنطيسية. عندما يتذكر الناس التيار الكهربائي يتبادر إلى أذهانهم الإلكترونات التي تحمل الشحنات عبر الأسلاك. وفي الواقع، تسري معظم الطاقة عبر المجالات الكهربائية والمغنطيسية المحيطة بالأسلاك. وتدخل هذه الطاقة إلى السلك، وتحل محل الطاقة التي تفقدها الإلكترونات للتغلب على المقاومة. وتعوض البطارية أو المولد أو أي مصدر طاقة آخر الطاقة المفقودة من المجالات باستمرار.

وفي دوائر التيار المستمر تسري الإلكترونات من أحد طرفي البطارية، عبر الدائرة، إلى الطرف الآخر. ولكن طاقة المجالين الكهربائي والمغنطيسي تسري في نفس الوقت من كلا الطرفين إلى النبيطة الكهربائية. وفي دوائر التيار المتناوب تتحرك الإلكترونات المفردة في السلك إلى الأمام ثم إلى الخلف، ولا تنتقل عبر الدائرة كلها. وبالرغم من ذلك تسري الطاقة الكهربائية من مصدر الطاقة إلى النبيطة في شكل مجالين كهربائي ومغنطيسي.

تأثيرات الكهرباء :

التحكم في التيار الكهربائي. المفتاح الكهربائي هو أبسط وسائل إيقاف التيار المار عبر دائرة، ويتكون من موصلين كهربائيين، يمكن المباعدة بينهما لتكوين فجوة في الدائرة. فعند غلق المفتاح تنفتح الفجوة، ويتوقف مرور التيار. وعند فتح المفتاح يتصل الموصلان ويسري التيار.

وتصبح الأسلاك والنبائط الكهربائية ساخنة إلى درجة الخطورة في حالة مرور كمية كبيرة من التيار عبرها. وتحمي مفاتيح تسمى الصهائر والقواطع الكهربائية التوصيلات في معظم الأبنية، حيث تقطع الصهيرة أو القاطع الكهربائي التيار عندما يكون عدد كبير من النبائط الكهربائية موصلاً إلى مأخذ التيار.وتحتوي العديد من النبائط الكهربائية أيضًا على صهائر.

وفي بعض الأحيان يحتاج الناس تغيير قوة التيار بدلاً من مجرد قطعه أو وصله. ومن طرق ضبط قوة التيار تغيير المقاومة داخل الدائرة. فعلى سبيل المثال، تؤدي إدارة مقبض الصوت في المذياع إلى تشغيل مقاوم متغير، حيث تضبط هذه النبيطة مقاومة سريان التيار عبر المذياع، وترفع بذلك الصوت أو تخفضه.

ولا تستطيع المفاتيح والمقاومات المتغيرة تغيير التيار بسرعة، ولذلك تستخدم نبائط شبه موصلة دقيقة تسمى الترانزستورات، لضبط التيار بسرعة أكبر، حيث تقطع الترانزستورات التيار وتصله بلايين المرات في الثانية الواحدة. وتحتوي بعض النبائط على ملايين الترانزستورات في رقاقة دقيقة واحدة من السليكون تسمى الدائرة المتكاملة، أو باختصار الرقاقة. وتشكل الدوائر المتكاملة منطقة القلب في الحواسيب والآلات الحاسبة وألعاب الفيديو والعديد من النبائط الأخرى.

ويقال عن النبائط التي تدار بالكهرباء إنها إلكترونية إذا كانت تحمل إشارات كهربائية يمكن تغييرها بطريقة أو أخرى لتمثيل المعلومات. وتشمل النبائط الإلكترونية الترانزستورات والثنائيات والمكثفات والمحاثات والدوائر المتكاملة. وقد تمثل الإشارات أصواتًا أو صورًا أو أرقامًا أو حروفًا أو تعليمات حاسوبية أو أي معلومات أخرى. ففي مضخم حاكي القرص المدمج، على سبيل المثال، توفر الترانزستورات سلسلة متصلة من التيارات لتقوية الإشارات الكهربائية الممثلة للأصوات التي يعاد الاستماع إليها.

السلامة الكهربائية

السلامة مع الكهرباء قد يشكل الكهرباء خطورة على حياتك، ولكن اتباع موجهات معينة قد يساعدك على تجنب الإصابة الكهربائية.

يعرف معظم الناس أن التيار الكهربائي يمكن أن يمثل خطرًا. وقد تساعد معرفة سبب الخطورة على تلافي الإصابات الكهربائية واستخدام الطاقة الكهربائية بأمان.

الصدمة الكهربائية. تنتج الصدمة الكهربائية عن مرور التيار الكهربائي في الجسم. فالإشارات الكهربائية الخاصة بالجسم تنتقل عادة عبر الأعصاب حاملة المعلومات من الدماغ وإليه. وتنظم هذه الإشارات الكهربائية نبض القلب وغيره من الوظائف الحيوية. ويؤدي التيار المنساب عبر الجسم إلى تعطل عمل هذه الإشارات، مما يؤدي بدوره إلى تقلص العضلات وفشل القلب والرئتين والوفاة. وقد يحرق التيار الكهربائي الجلد وأنسجة الجسم الأخرى.

وتقيس الفولتية قوة الدفع التي يوفرها مصدر الطاقة الكهربائية لتحريك الشحنة عبر الدائرة. وقوة دفع بطارية الكشاف الضوئي أو المذياع صغيرة جدًا عادة، ولا تسبب أي إصابات تذكر. أما الفولتية المتاحة عبر مآخذ التيار في المنازل، والبالغة 240 فولت، فخطيرة جدًا،

وقد تؤدي إلى الوفاة. وتشتد خطورة الصدمة الكهربائية عندما يكون جلد الشخص مبللاً بالماء، وذلك لأن الماء المخلوط بأملاح الجلد يضعف مقاومة الجسم للتيار الكهربائي، مما يؤدي إلى مرور تيار كهربائي كبير عبر الجسم. وللحصول على بعض المعلومات المرتبطة بالإسعافات الأولية الخاصة بالصدمة الكهربائية انظر : الإسعافات الأولية .

وتحتوي معظم النبائط الكهربائية على وسائل أمان تمنع حدوث الصدمات الكهربائية، كما تحتوي الكثير من الأجهزة والأدوات على قابس ذي مشبك ثالث يربط الأجزاء الفلزية للنبيطة إلى سلك يقود إلى الأرض. وفي حالة تعطل التوصيلات داخل النبيطة يسمح المشبك الثالث للتيار بالإنسياب إلى الأرض.

أخطار الكهرباء خارج المنازل. إذا تسلقت شجرة قريبة من خط قدرة كهربائية، قد تصاب بصدمة إذا لامست الشجرة خط القدرة. وتسقط العواصف أحيانًا خطوط القدرة، وقد يصاب الشخص أو يقتل إذا لامس هذه الخطوط وهي مشحونة بالكهرباء.

وقد تبلغ فولتية التعريفات الكهربائية الناتجة عن الصواعق 100 مليون فولت، وهي كافية لإمرار تيار كهربائي عبر الجسم، يمكنه قتل الشخص. ويمكنك تجنب ضربات الصواعق بالمكوث داخل المنزل أثناء العواصف.

أما إذا صادفتك الصاعقة خارج المنزل فابتعد عن الحقول المكشوفة والأماكن العالية. والغابة أكثر أمنًا من الأرض المكشوفة، ولكن ينبغي تجنب الوقوف تحت الشجرة الطويلة أو المعزولة، والتي تكون أكثر عرضة للصواعق. ومن أكثر الأماكن أمنًا أثناء الصواعق السيارات، حيث يمتص السطح الفلزي الخارجي للسيارة الشحنات الكهربائية، تاركًا الأجزاء الداخلية بعيدة عن تأثير التيار.

الحريق الكهربائي. من أخطار الكهرباء. فعند مرور تيار كهربائي عبر موصل، تسبب المقاومة الناتجة ارتفاع درجة حرارة الموصل. وقد تكون الحرارة الناتجة مفيدة أحيانًا، حيث تستخدم الحرارة الناتجة عن تسخين الأسلاك في بعض أجهزة الطبخ. ولكن التسخين الزائد للأسلاك قد يؤدي إلى حدوث حريق، حيث تدمر الحرائق الكهربائية الكثير من المنازل كل عام. ولتجنب الحرائق ينبغي عدم توصيل نبائط عديدة إلى مأخذ تيار واحد، وتجنب استخدام النبائط ذات الأسلاك المتقطعة أو البالية.

الكهرباء والمغنطيسية

المغنطيس الذي تثبته على ثلاجتك قد لا يبدو ذا علاقة بالكهرباء. ولكن المغنطيسية في الواقع ذات علاقة وثيقة بالكهرباء. فكما يحيط المجال الكهربائي بالشحنة الكهربائية، وينتج قوة تؤثر على الشحنات الأخرى، يحيط المجال المغنطيسي بالمغنطيس، وينتج قوى تؤثر على المغانط الأخرى. ومثل الشحنة الكهربائية، يستطيع المغنطيس جذب مغنطيس آخر أو إبعاده. وبالإضافة إلى ذلك، تنتج المغنطيسية عن التيارات الكهربائية. وفي المغانط الدائمة تنتج التيارات عن حركة الإلكترونات في بعض الذرات. فالإلكترونات تتحرك على محاورها، وتحيط بالنويات الذرية.

تكوِّن المغنطيسية والكهرباء معًا قوة أساسية في الكون تسمى الكهرومغنطيسية. وتعتمد هذه القوة على حقيقة أن حركة الشحنات الكهربائية تنتج مجالات مغنطيسية، وأن المجالات المغنطيسية المتغيرة تنتج تيارات كهربائية.

فإمرار تيار كهربائي عبر ملف سلكي، على سبيل المثال، يحول الملف إلى مغنطيس مؤقت يسمى المغنطيس الكهربائي، حيث يولد التيار الكهربائي مجالاً مغنطيسيًا حول الملف السلكي. ويظل الملف مغنطيسيًا طالما استمر مرور التيار الكهربائي فيه.

وتستطيع المغنطيسية بدورها إنتاج تيار كهربائي عن طريق الحث الكهرومغنطيسي. وفي هذه العملية يتحرك ملف سلكي قرب مغنطيس، حيث تسبب هذه الحركة مرور تيار كهربائي عبر السلك، يستمر مع استمرار الحركة. وتنتج المولدات التيار الكهربائي بهذه الطريقة.

وتنتج المجالات الكهربائية والمغنطيسية المتغيرة معًا الموجات الكهرومغنطيسية، التي تسمى أيضًا الإشعاع الكهرومغنطيسي. وتنقل هذه الموجات طاقة تسمى الطاقة الكهرومغنطيسية بسرعة الضوء. وتكوِّن الموجات الكهرومغنطيسية الضوء والإشارات الإذاعية والتلفازية والموجات الدقيقة، كما تكوِّن الأشعة تحت الحمراء التي تحس بها في شكل حرارة عند وقوفك قرب موقد ساخن، والأشعة فوق البنفسجية التي تسبب حرق الشمس. والأشعة السينية التي يستخدمها الأطباء في فحص الأجزاء الداخلية لجسمك تتكون أيضًا من الموجات الكهرومغنطيسية، كما تتكون منها أيضًا أشعة جاما الصادرة عن المفاعلات النووية، أو القادمة من الفضاء الخارجي.

نبذة تاريخية

إنجازات تاريخية في الكهرباء

الاكتشافات المبكرة. لاحظ الإغريق القدماء قبل بضعة آلاف سنة أن مادة تسمى الكهرمان تجذب إليها المواد الخفيفة مثل الريش والقش، بعد دلكها بقماش. والكهرمان مادة أحفورية ناتجة عن تصلب أشجار الصنوبر التي عاشت قبل ملايين السنين. وهو عازل جيد للكهرباء، ولذلك فهو يمسك الشحنة الكهربائية بسهولة. وبالرغم من أن الإغريق لم يعرفوا الشحنة الكهربائية فقد كانوا في الواقع يجرون تجارب على الكهرباء الساكنة عندما كانوا يدلكون الكهرمان بالقماش.

وعرف بعض القدماء، ومنهم الإغريق والصينيون القدماء، أيضًا مادة صلبة أخرى يمكنها جذب الأشياء، وهي المادة المسماة اللودستون أو الماجنتيت. وهو معروف اليوم بأنه مغنطيس طبيعي ميال إلى جذب الأجسام الحديدية الثقيلة، بينما يجذب الكهرمان الأشياء الخفيفة مثل القش. وفي عام 1551م أثبت عالم الرياضيات الإيطالي جيرولامو كاردانو، والمعروف أيضًا باسم جيروم كاروان، أن التأثيرات الجذبية لكل من الكهرمان والماجنتيت لابد أن تكون مختلفة. وكان كاردانو أول من لاحظ الفرق بين الكهرباء والمغنطيسية.

وفي عام 1600م، أوضح الفيزيائي البريطاني وليم جيلبرت أن بعض المواد، مثل الزجاج والكبريت والشمع، ذات خواص شبيهة بخواص الكهرمان. فعند دلكها بقماش تكتسب هذه المواد خاصية جذب الأشياء الخفيفة. وقد سمى جيلبرت هذه المواد الكهربيات، ودرس خواصها، وخلص إلى أن تأثيراتها ربما تُعزى إلى نوع من السوائل. ونحن نعرف اليوم أن ما سماها جيلبرت الكهربيات هي عوازل جيدة للكهرباء.

تجارب الشحنة الكهربائية. في ثلاثينيات القرن الثامن عشر وجد العالم الفرنسي تشارلز دوفاي أن القطع الزجاجية المشحونة تجذب المواد الشبيهة بالكهرمان، ولكنها تتنافر مع المواد الشبيهة بالزجاج، واستنتج من ذلك أن هناك نوعين من الكهرباء سماهما الكهرباء الزجاجية (للمواد الشبيهة بالزجاج)، والكهرباء الراتينجية (للمواد الشبيهة بالكهرمان). وبذلك استطاع دوفاي التوصل إلى نوعي الشحنات الكهربائية السالبة والموجبة، بالرغم من أنه اعتقد أنهما نوعان من "السوائل الكهربائية".

بدأ العالم ورجل الدولة الأمريكي بنجامين فرانكلين تجاربه على الكهرباء في عام 1746م. وقد بنى هذه التجارب على اعتقاد مفاده أن هناك نوعًا واحدًا من السوائل الكهربائية.

فالأجسام التي تحمل كمية كبيرة من السائل تتنافر، بينما تتجاذب الأجسام التي تحمل كمية قليلة من السائل. وإذا لامس جسم به فائض من السائل جسمًا آخر قليل السائل يتقاسم الجسمان السائل. وقد أوضحت فكرة فرانكلين كيف تلغي الشحنات المتضادة بعضها بعضًا عندما تتلامس.

استخدم فرانكلين مصطلح موجب للإشارة لما اعتقد أنه فائض من سائل، كما استخدم مصطلح سالب لنقصان السائل. ولم يعرف فرانكلين أن الكهرباء ليست سائلاً، بل يرتبط بشحنات الإلكترونات والبروتونات. ونحن نعرف اليوم أن الأجسام المشحونة بشحنة موجبة تحمل عددًا قليلاً من الإلكترونات، بينما تحمل الأجسام المشحونة بشحنة سالبة فائضًا من الإلكترونات.

وفي عام 1572م، أجرى فرانكلين تجربته الشهيرة التي أطلق فيها طائرة ورقية أثناء عاصفة برقية، حيث اكتسب كل من الطائرة والخيط شحنة كهربائية، فاعتقد فرانكلين أن السحب نفسها مشحونة أيضًا بالكهرباء، كما رسخ في اعتقاده أن البرق شرارة كهربائية هائلة. ومن حسن حظ فرانكلين أن البرق لم يمس الطائرة، إذ ربما أدى ذلك إلى قتله.

وفي عام 1767م، صاغ العالم الإنجليزي جوزيف بريستلي القانون الرياضي الذي يوضح كيف تضعف قوة الجذب بين الجسمين المشحونين بشحنات متضادة كلما زادت المسافة بين الجسمين. وفي عام 1785م، أكد العالم الفرنسي شارل أوغسطين دو كولمبو قانون بريستلي، بنفس الشحنة. ويطلق على هذا المبدأ اليوم اسم قانون كولمبو.

وفي عام 1771م، وجد عالم التشريح الإيطالي لويجي جالفاني أن رجل الضفدعة المقتولة حديثًا ترتعش إذا لُمست بفلزين مختلفين في الوقت نفسه، وحظيت هذه التجربة بانتباه شديد. وفي أواخر تسعينيات القرن الثامن عشر قدم الفيزيائي الإيطالي أليساندرو فولتا تفسيرًا لذلك، حيث أوضح أن تفاعلاً كيميائيًا يحدث في المادة الرطبة الملامسة لفلزين مختلفين، وينتج عن التفاعل الكيميائي تيار كهربائي. وهذا التيار هو الذي أدى إلى ارتعاش رجل الضفدعة في تجربة جالفاني. جمع فولتا أزواجًا من الأقراص يتكون كل منها من قرص من الفضة وقرص من الخارصين، وفصل بين الأزواج بورق أو قماش مبلل بالماء المالح. وبرص عدد من هذه الأقراص صمم فولتا أول بطارية، وأطلق عليها اسم عمود فولتا

وتلا ذلك العديد من التجارب على عمود فولتا وعلى الدوائر الكهربائية. واستنبط الفيزيائي الألماني جورج أوم قانونًا رياضيًا يحدد العلاقة بين التيار والفولتية والمقاومة لمواد معينة. وحسب قانون أوم، الذي نشر في عام 1827، تدفع الفولتية الكبيرة تيارًا كبيراً عبر مقاومة معينة. وبالإضافة إلى ذلك تدفع فولتية معلومة تيارًا كبيراً عبر المقاومة الصغيرة.

الكهرباء والمغنطيسية. في عام 1820م، وجد الفيزيائي الدنماركي هانز أورستد أن التيار الكهربائي الذي يسري قرب إبرة بوصلة يجعل الإبرة تتحرك. وقد كان أورستد أول من أوضح وجود علاقة محددة بين الكهرباء والمغنطيسية. وخلال عشرينيات القرن التاسع عشر اكتشف أندريه ماري أمبير العلاقة الرياضية بين التيارات والمجالات المغنطيسية. وتعد هذه العلاقة، التي عرفت بقانون أمبير، أحد القوانين الأساسية في الكهرومغنطيسية

وفي أوائل ثلاثينيات القرن التاسع عشر اكتشف العالم الإنجليزي مايكل فارادي والفيزيائي الأمريكي جوزيف هنري، كل على انفراد، أن تحريك مغنطيس قرب ملف سلكي، يولد تيارًا كهربائيًا في السلك. وأوضحت تجارب تالية أن تأثيرات كهربائية تحدث في أي وقت يحدث فيه تغيير في مجال مغنطيسي. وتبنى التسجيلات السمعية والبصرية والأقراص الحاسوبية والمولدات الكهربائية على هذا المبدأ.

وقد جمع الفيزيائي الأسكتلندي جيمس كلارك ماكسويل كل القوانين المعروفة، ذات العلاقة بالكهرباء والمغنطيسية، في مجموعة واحدة من أربع معادلات. وتصف قوانين ماكسويل، التي نشرت في عام 1865م، بوضوح، كيف تنشأ المجالات الكهربائية والمغنطيسية وتتداخل. وقدم ماكسويل طرحًا جديدًا يقضي بأن المجال الكهربائي المتغير ينتج مجالاً مغنطيسيًا، وقاده ذلك إلى افتراض وجود الموجات الكهرومغنطيسية، المعروفة الآن بأنها تشمل الضوء والموجات الراديوية والأشعة السينية. وفي أواخر ثمانينيات القرن التاسع عشر أوضح الفيزيائي الألماني هينريتش هرتز كيفية توليد الموجات الراديوية، والكشف عنها، ودعم بذلك افتراض ماكسويل. وفي عام 1901م، استطاع المخترع الإيطالي جوليلمو ماركوني نقل الموجات الكهرومغنطيسية عبر المحيط الأطلسي، ممهدًا بذلك لمرحلة الإذاعة والتلفاز وأقمار الاتصالات والهواتف الخلوية.

إنجازات تاريخية في الكهرباء

العصر الإلكتروني. اعتقد الفيزيائي الأيرلندي ج. جونستون ستوني أن التيار الكهربائي ينتج عن حركة جسيمات صغيرة جدًا، مشحونة كهربائيًا. وفي عام 1891م، اقترح أن تسمى هذه الجسيمات الإلكترونات. وفي عام 1897م، أثبت الفيزيائي الإنجليزي جوزيف جون طومسون وجود الإلكترونات، وأوضح أنها تدخل في تركيب كل الذرات. وفي بحث نشر في عام 1913م، قاس الفيزيائي الأمريكي روبرت ميليكان بدقة شحنة الإلكترون.

وفي أواخر القرن التاسع عشر، اكتشف العلماء أن الإلكترونات يمكن فصلها عن أسطح الفلزات وتفريغها في صمام مفرغ. والصمام المفرغ أنبوب زجاجي أزيل عنه معظم الهواء، ويحتوي على أقطاب متصلة بأسلاك تمتد عبر الزجاجة. ويؤدي ربط بطاريات إلى الأقطاب إلى سريان تيار من الإلكترونات داخل الصمام. ويمكن ضبط التيار بالتحكم في الفولتية. وتستطيع الصمامات المفرغة تضخيم التيارات الكهربائية الضعيفة ودمجها والفصل بينها. وقد مهد هذا الاختراع الطريق لصنع أجهزة المذياع والتلفاز وغيرها من التقنيات.

وفي عام 1947م، اخترع الفيزيائيون الأمريكيون جون باردين ووالتر براتين ووليم شوكلي الترانزستور. وتؤدي الترانزستورات نفس وظائف الصمامات المفرغة، ولكنها أصغر من الصمامات المفرغة، وأكثر تحملاً، وتستهلك طاقة أقل. وبحلول ستينيات القرن العشرين حلت الترانزستورات محل الصمامات المفرغة في معظم المعدات الإلكترونية. ومنذ ذلك التاريخ تمكنت شركات الإلكترونات من تصغير حجم الترانزستور إلى حد كبير. واليوم توضع ملايين الترانزستورات، المتصلة بعضها ببعض، في رقاقة واحدة تسمى الدائرة المتكاملة.

التطورات الأخيرة. يزداد الطلب العالمي على الطاقة الكهربائية عامًا بعد عام. وتأتي معظم الطاقة الكهربائية التي نستخدمها من محطات القدرة التي تحرق الوقود الأحفوري مثل الفحم والزيت والغاز الطبيعي. ويأتي جزء من الطاقة الكهربائية من المحطات النووية والكهرمائية (محطات القدرة المائية)، بينما تأتي كميات صغيرة من الخلايا الشمسية وطواحين الهواء وغيرها من المصادر.

وتثير محدودية مخزون الأرض من الوقود الأحفوري، واحتمال نفاده، قلق الكثيرين. ومن المشاكل الأخرى أن طرق توليد الطاقة الكهربائية المستخدمة حاليًا قد تضر البيئة. ولذلك يحاول العلماء والمهندسون،

كما تحاول شركات القدرة الكهرمائية، إيجاد مصادر بديلة للطاقة الكهربائية. ومن هذه البدائل الطاقة الشمسية والجيوحرارية وطاقة الرياح وطاقة المد والجزر. انظر: مخزون الطاقة (المشكلات؛ التحديات).

ويأمل العديد من العلماء أن يؤدي استخدام نبائط كهربائية جديدة إلى الحد من الطلب المتزايد على الطاقة الكهربائية. فالحواسيب على سبيل المثال، قد تتحكم في أنظمة الإنارة التي توفرها المصابيح الضوئية العادية، ولكنها تستهلك خمس الطاقة الكهربائية التي تستهلكها هذه المصابيح. وتمكن الحواسيب ونظم الاتصالات الحديثة الناس من العمل في المنازل، مما يوفر الطاقة المستهلكة في المواصلات

كان الأهالي في السابق قبل وصول الكهرباء يعتمدون على المصابيح التي تعمل عن طريق الكروسين في الإنارة وعلى المهاف المصنوعة من سعف النخيل في التهوية وكان الكيروسين المستخدم لهذه المصابيح يجلب من الجمهورية الأيرانية (عبدان) كما كان يوجد في منطقة السويفية بالمنامة مستودع كبير لهذا الغرض تعود ملكيته للتاجر المرحوم يوسف بن أحمد كانو، ويوجد حداد يقوم بعمل علب تستعمل لإضاءة البيت أو الدكان ، حيث يوضع في هذه العلبة الكيروسين وتتدلى به قطعة من القطن تسمى فتيلة

كما كان يستعمل أيضاً المصباح "الفنر" وهذا يوضع بداخله الكيروسين وقطعة من على شكل حزام عرضها تقريباً بوصتان أما في المساجد فيستعمل مصباح من الحجم الكبير ويستخدمه بعض الأهالي في بيوتهم.

وظل هذا الوضع قائماً إلى أن بدأ التفكير في إدخال الكهرباء في البحرين وقد تعثر تنفيذ هذا المشروع وتم تأجيله لعدة مرات والسبب في ذلك يعود إلى عدة أسباب منها مالية .

فقد كان مشروع الكهرباء هو الهاجس الأكبر لدى المسئولين في حكومة البحرين ، فقد قامت الدولة بتحقيق هذا الحلم ليصبح حقيقة واقعية على الرغم من قلة الميزانية التي استمرت عقبة في تحقيق هذا الحلم . ففي عام 1928م أعيد النظر في هذا المشروع مرة ثانية وعلى أثر ذلك وضعت دراسة وافية حول تشغيل هذا المشروع الحيوي وأخذ المسئولون في الدولة يتباحثون حول كيفية تشغيله ، وبالفعل بدأت عملية التوزيع وكذلك التركيب وتنظيم الأمور الفنية وكذلك الإدارية وبعد ذلك قامت الحكومة على هذا المشروع ، كما اسند إلى إدارة بلدية المنامة مهمة إدارته والإشراف عليه.

وقد استعانت الحكومة بالسيد (استيفن) والذي كان يشغل وظيفة مفتش كهربائي وذلك للعمل في البحرين للإعداد لمشروع تشغيل الكهرباء بما فيها إنارة بعض الشوارع ومكاتب الحكومة في المنامة ، وبهذه المناسبة فقد عقد اجتماع عام في مدينة المنامة حيث تقرر فيه ضرورة تشكيل مؤسسةأو شركة تساهم فيها كل من الحكومة وبلدية المنامة والتجار بحصص متساوية وبرقابة متساوية أيضاً على إدارة هذا المشروع إلا إنه مع الأسف لم يحظى هذا الاقتراح قبولا لدى التجار والذين كانوا يمثلون في الواقع عامة الناس . من جانب أخر فقد سار هذا المشروع الحيوي الهام سيراً حثيثا ، ومن ناحية أخرى فقد وافق المجلس البلدي في المساهمة بنسبة 20% من تكلفة المشروع وذلك بعد دراسته دراسة مستفيضة من قبل أعضاء المجلس. وما أن حل شهر ديسمبر 1929م حتى وصلت أغلب المعدات والمكائن ، وبدأت تدور عجلة الأيام ويتحقق ذلك الحلم ويفتح الناس أعينهم يوم 11 مايو سنة 1930 م ليروا النور

وقد أنبثق من تلك اللمبات المعلقة لتنير البحرين لم ولن ينساها شعب هذا البلد الطيب.

فقد قام بافتتاحها المغفور له الشيخ حمد بن عيسي آل خليفة ، وكانت هذه المحطة في منطقة رأس الرمان وهى تعتبر أول محطة للطاقة الكهربائية في البحرين والخليج العربي .

فقد أطلق عليها فيما بعد اسم محطة المنامة"أ" وكانت تتكون من مولدين يعملان بالديزل ، طاقة كل منهما 100 كيلو واط ويتصلان بلوحة توزيع بجهد 3300 فولت ، ومن الجدير بالذكر أن الوقود اللازم للمحطة كان يستورد من عبدان في إيران لأن النفط لم يكن قد أكتشف بعد في البحرين . وفي نهاية عام 1930م تمت دراسة مشروع إيصال الكهرباء إلى مدينة المحرق وبعد دراسات ومناقشات طويلة تقرر قبول عرض شركة (كلندر كيبل المتحدة) وذلك بعد إجراء بعض التغيرات عليه ، وقد بلغ إجمالي التكلفة المقدمة من هذه الشركة 000و53 روبية (ثلاثة وخمسون ألف روبية) على أن ينتهي تنفيذ هذا المشروع في 31/ 1931/9م ، كما قامت بلدية المحرق بدفع 20% من تكلفة هذا المشروع .في عام 1937 -1938 زودت الكهرباء ل25 محل في مدينة المحرق. ويعد هذا المشروع الأول من نوعه في المنطقة.

وقد أستخدم في توصيل الكهرباء للمحرق خط علوي بجهد 3300 فولت أقيم طول الجسر الذي كان قيد الإنشاء بين المحرق والمنامة (جسر الشيخ حمد) وقد كان جزء من هذا الخط عبارة عن كابل تحت البحر ممتد بين المحرق والمنامة .

أما باقى مدن وقرى محافظة المحرق فقد تم توصيل الكهرباء إليها في يونيه من عام 1956م. ولكن ومع بداية هذا المشروع فقد لم يألفه الأهالي ولم يعتادوا عليه ، فقد امتنعوا عن إدخال الكهرباء لمساكنهم ومحلاتهم التجارية في البداية وذلك لتخوفهم منها ، إلا إنه وبالمقابل فقد أعجب عدد بسيط بهذه الفكرة واستفادوا منها ، لذلك فقد قامت إدارة الكهرباء بحملة توعوية كبيرة وكانت تهدف إلى اطلاع المواطنين على فوائد الكهرباء ، وأخذت كذلك تشجع لتوظيف أيد عاملة فنية تقوم أيضا بتدريبهم لأجل أن يسير المشروع على أكمل وجه .

الفصل الثاني
طرق الاستكشاف الكهربية

الاستكشاف الكهربي الأرضي Geoelectrical Exploration متنوع بشكل أكبر بكثير من الطرق الجيوفيزيائية الأخرى، حيث أن بعض الطرق الكهربية مثل طريقة الجهد الذاتي Self-Potential والتيارات الأرضية الكهرومغناطيسية تعتمد على تأثير المجالات الناشئة طبيعياً وهى تشبه في هذا الخصوص استكشاف الجاذبية والمغناطيسية.وطرق أخرى تحتاج تيارات أو مجالات كهربية التي تدخل في الأرض صناعيا ، وهى تشبه في هذا الخصوص الأساليب السيزمية . وتنتمي إلى هذا النوع طرق المقاومة النوعية والكهرومغناطيسية، والاستقطاب المستحث Induced Polarization.وبسبب تنوع أساليب الاستكشاف الجيوكهربى بالمقارنة مع الطرق الأخرى سوف لا تعامل بنفس التفصيل مثل طرق السيزمية الجاذبية والمغناطيسية . والطرق الكهربية لها تطبيقات كثيرة حيث تستخدم في البحث عن الفلزات والمعادن والمياه الجوفية وتستخدم أيضا بدرجة متزايدة في الجيولوجيا الهندسية Engineering Geology، حيث تستخدم قياسات المقاومة النوعية لإيجاد عمق صخور الأساس Bed Rocks، وكذلك في الاستكشاف الجيولوجي الحراري Geothermal Exploration. بالإضافة إلى تطبيقاتها المهمة في الكشف والتنقيب عن الآثار.

الخواص الكهربية للصخور:

الاستكشاف الكهربي يستخدم ثلاث خواص أساسية للصخور.

المقاومة النوعية Resistivity: أو عكس الموصلية النوعية Conductivity والتي تحكم كمية التيار الذي يمر خلال الصخر .

النشاط الكهروكيميائى Electrochemical:النشاط الكهروكيميائى للصخور يعتمد على تركيبها المعدني و على التركيب والتركيز للمحاليل الكهربية المذابة في المياه الجوفية حيث أن فروق الجهد الكهربائية الناتجة بالتفاعلات الكهروكيميائية تنتج نتيجة للتماس بين المعادن والمحاليل التي تكون على تماس معها. وهذا النشاط وفروق الجهد الناتجة يشكل الأساس لطرق الجهد الذاتيSP والإستقطاب الحثى IP.

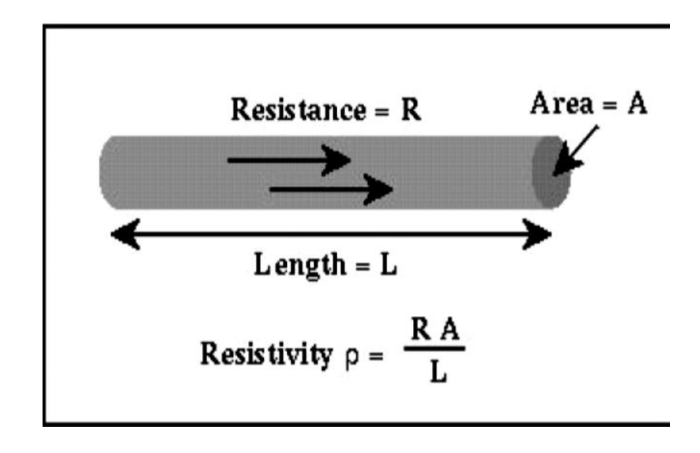
ثابت العزل Dielectric constant or Permitivity:

يعطى معلومات عن سعة مادة الصخر لتخزين شحنة كهربائية ويتحكم جزئيا في تجاوب تكوينات الصخر للتيارات عالية التردد والداخلة في الأرض بوسائل توصيلية أو حثية. ثابت العازل الذي يناظر النفاذية في المواد المغناطيسية هو مقياس للاستقطاب لمادة ما في مجال كهربي.

طريقة المقاومة النوعية Resistivity Method

المقاومة النوعية Resistivity:

تعريف: المقاومة النوعية لأي مادة تعرف على أنها مقاومة أسطوانة ذات مقطع عرضي مساحته وحدة المساحة وطول الأسطوانة وحدة الطول. لو أن مقاومة أسطوانة موصلة ذات طول l و مساحة مقطع عرضي A هي R . تكون المقاومة النوعية ρ معبرا عنها بالمعادلة:

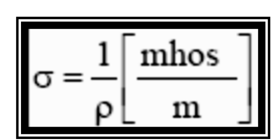


$\rho = R\ A/l$

لو أردنا أن نعرف وحدة القياس للمقاومة النوعية فإن:

$\rho = R\ A/l = ohm.m2\ /m = ohm.m$

أي أن الوحدة المقبولة عامة للمقاومة النوعية هي الأوم - متر.و الموصلية الكهربية تساوى /ρ1 ووحدتها mho/m أو siemens/m .



$$\sigma = \frac{1}{\rho}\left[\frac{mhos}{m}\right]$$

س: لماذا نستخدم المقاومة النوعيةResitivity وليس المقاومة الأومية Resistance:

المشكلة مع استخدام المقاومة الأومية بأنها لا تعتمد فقط على نوع المادة ولكن تعتمد على شكل المادة حيث أن المقاومة الأومية لسلك تزداد مع طول السلك وتقل مع زيادة مساحة المقطع . ولكننا في المسح الجيوفيزيائى نريد خاصية فيزيائية تقيس قدرة المادة على إمرار التيار الكهربي خاصية تميز المادة بغض النظر عن شكلها الهندسي. وهذه الخاصية الفيزيائية التي تميز المادة ولا تعتمد على شكل المادة هي المقاومة النوعية للمادة أو Resistivity ويرمز لها بالرمز ρ .

س: ما الذي يتحكم في قيمة المقاومة النوعية للصخور؟

قبل الإجابة عن هذا السؤال المهم يجب أن نراجع معا الطرق المختلفة التي يتم بها توصيل التيار الكهربي في المواد. و هي ثلاث وسائل:

توصيل إلكتروني ويتم بحركة الإلكترونات خلال المعادن جيدة التوصيل للكهرباء وهذا يتوقف على وجود عدد من الإلكترونات المنفردة في المدارات الخارجية للمعادن ومن أمثلة هذه المعادن الكبريتيدات والجرافيت والنحاس.

التوصيل الإلكتروليتى ويتم بحركة الأيونات في السوائل.

الاستقطاب الكهربي ويتم من حركة الأيونات المشحونة لمسافة قصيرة نتيجة تأثير مجال كهربي خارجي ثم يتوقف.

إن التوصيل الكهربائي في معظم الصخور هو النوع الإلكتروليتى بالأساس. وذلك لأن معظم الحبيبات المعدنية عازلة (ماعدا الخامات الفلزية والمعادن الطينية)، ويتم التوصيل الكهربائي من خلال المياه البينية في المسامات والشقوق. لذلك تعتمد مقاومية التكوين الصخري عموما على مقاومية الإلكتروليت الموجود وتتناسب عكسيا مع المسامية ودرجة الإشباع.

على العموم، يمكن القول بأن الصخور الصلبة Hard rocks عبارة عن موصلات رديئة للكهربية، ولكن التوصيل يتم على طول وامتداد الكسور والشقوق. أما في التكوينات الرسوبية المسامية فتتحكم درجة الإشباع water saturation وطبيعة الإلكتروليت والمسامية في المقاومية. لذلك تعتبر المقاومية معاملا متغيرا، ليس فقط من تكوين الصخري إلى آخر ولكن حتى ضمن التكوين نفسه. حيث لا توجد مضاهاة عامة بطبيعة الصخور مع المقاومية ولكن هناك تصنيفا واسعا يترتب بموجبه تصنيف صخور الطين والمارل، الأحجار الرملية والحصى، الحجر الجيري والصخور المتبلورة علي أساس زيادة المقاومية يبين أنواع الصخور المختلفة.

ويمكن إيجاز العوامل التي تتحكم أو تؤثر في المقاومة النوعية للصخور:

كمية الماء الموجود في مسام الصخور وهى تتناسب عكسيا مع المقاومة النوعية أي كلما زاد تشبع الصخر بالمياه قلت مقاومته لمرور التيار الكهربي.

الملوحة للسائل المسامى وهى تتناسب عكسيا مع المقاومة النوعية أي كلما زاد ملوحة المياه الجوفية قلت مقاومة الصخر لمرور التيار الكهربي.

المسامية الصخرية والنفاذية لزيادة الممرات التي تساعد على حركة الإلكتروليتات وبالتالي فهي تتناسب عكسيا مع المقاومة النوعية أي كلما زاد المسامية والنفاذية قلت مقاومة الصخر لمرور التيار الكهربي.

درجة حرارة الصخر مما يؤدي إلى انخفاض لزوجة الصخر وبالتالي حرية حركة الإلكتروليت وبالتالي زيادة التوصيلية.

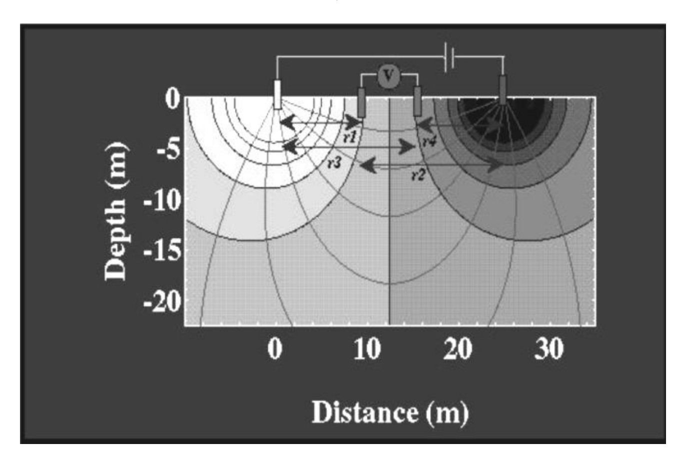
زيادة نسبة معادن الطين في الصخر تزيد من توصيلية الصخر

زيادة نسبة الشقوق الموجودة في الصخر والتي تعمل كممرات لحركة السوائل.

بما أن المقاومة هي خاصية كهربية أساسية لمواد الصخر ومرتبطة بشدة مع الخواص الصخرية ، فإن التوزيع تحت السطحي للمقاومة النوعية من قياسات على السطح يمكن أن تعطى معلومات مفيدة عن التركيب أو المحتوى للتكوينات المدفونة.

طرق المسح الحقلى لقياسات المقاومة النوعية

من الجدير بالذكر أن كل الطرق المستعملة لقياس المقاومة النوعية تتطلب قياس المقاومة النوعية الظاهرية من خلال إمرار تيار كهربي مستمر في الأرض عن طريق زوج من الأقطاب واستخدام زوج أخر لقياس الجهد المصاحب للتيار. دعنا نفترض أن جسما صخريا مقاوماته النوعية تساوى ρ ويفترض أن تيار قيمته Iأدخل في هذا الجسم الصخري من خلال أقطاب A و B وأن الجهد المصاحب لهذا التيار يقاس عبر القطبين C و D على سطح الأرض بحيث تكون المسافة بين هذه الأقطاب r1, r2, r3 and r4 كما في الشكل التالي:



بمعلومية المسافة بين الأقطاب r1, r2, r3 and r4 و قياس فرق الجهد ΔV بين أقطاب الجهد C و D وشدة التيار المارة إلى داخل الأرض I يمكن حساب قيمة المقاومة النوعية الظاهرية ρa كما يلي:

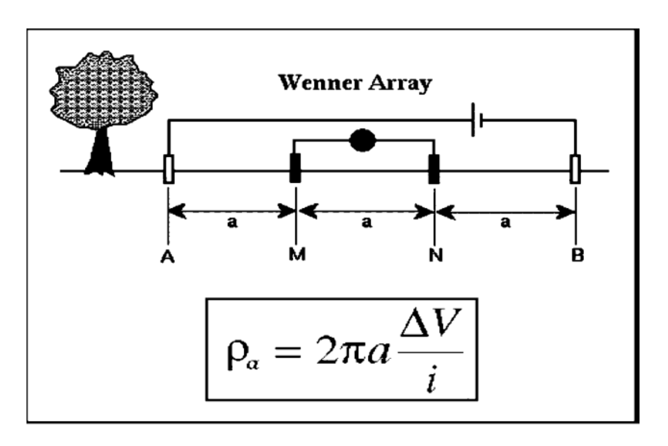
$$P\alpha = \frac{2\pi\Delta\nu}{\iota}\left[\left(\frac{1}{\frac{1}{\Gamma 1}-\frac{1}{\Gamma 2}-\frac{1}{\Gamma 3}+\frac{1}{\Gamma 4}}\right)\right]$$

هناك طرق عديدة للمسح الحقلى للمقاومة النوعية و لكن هنا سنركز على أكثر ثلاث طرق الأكثر شيوعا واستخداما وهم طرق Wenner و Sclumbergeur و Dipole-Dipole .

1- طريقة التحرى الأفقي Horizontal Profiling:

وتسمى هذه الطريقة بطريقة Wenner وتعتبر من ابسط هذه الطرق وتستخدم عندما يكون هناك تغيرات أو اختلافات أفقية أو تكون الطبقات أو الحواجز الصخرية عمودية بدلا من كونها أفقية. وغالبا تستخدم هذه الطريقة في الكشف عن هذه التغيرات الأفقية تحت السطحية.

في هذه الطريقة توضع الأقطاب على خط واحد و على مسافة متساوية من بعضهم البعض وتسمى هذه المسافة بتباعد منظومة فينر a كما في الشكل التالي. وبقياس فرق الجهد ΔV بين أقطاب الجهد M و N وشدة التيار المارة إلى داخل الأرض I بين أقطاب التيار A و B يمكن حساب قيمة المقاومة النوعية الظاهرية ρa كما في المعادلة المبينة مع الشكل التالى:



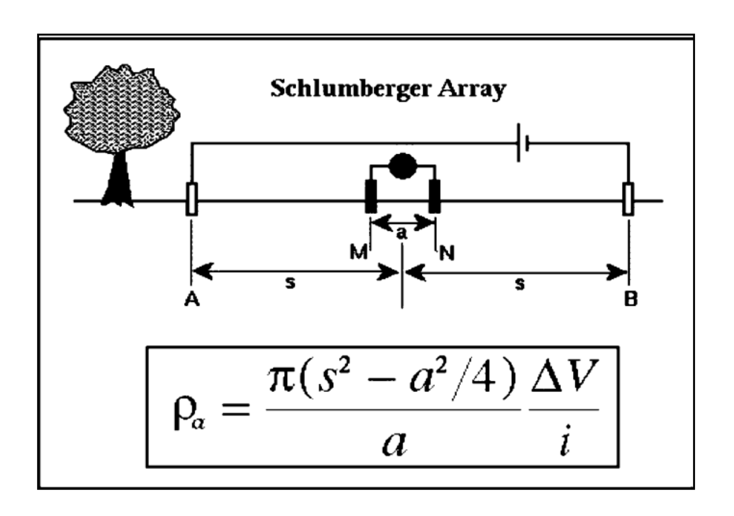
$$\rho_a = 2\pi a \frac{\Delta V}{i}$$

2- طريقة الجس (التصنت) الرأسي:

Vertical Electric Sounding or Drilling

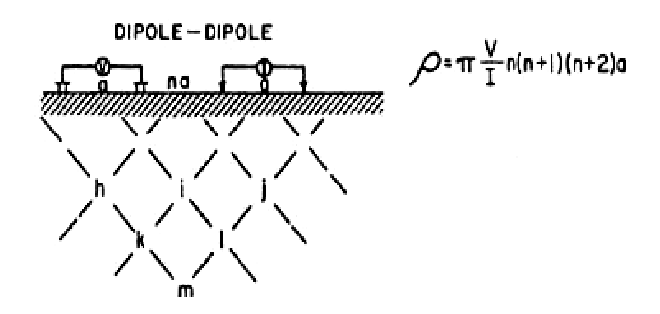
عندما تتكون الأرض من طبقات أفقية تقريبا، ويتطلب ذلك معرفة الاختلاف الرأسي في المقاومة النوعية، فإن طريقة الجس الكهربي تكون هي الوسيلة في استنتاج اختلاف المقاومة النوعية مع العمق تحت نقطة على السطح.

تسمى هذه الطريقة بطريقة Sclumberguer توضع الأقطاب على خط واحد وعلى مسافة غير متساوية من بعضهم البعض بحيث تكون المسافة بين قطبى الجهد a صغيرة بالمقارنة مع المسافة بين قطبي التيارS كما هو مبين بالشكل التالى. وبقياس فرق الجهد ΔV بين أقطاب الجهد M وN وشدة التيار المارة إلى داخل الأرض I بين أقطاب التيار A و B يمكن حساب قيمة المقاومة النوعية الظاهرية ρa كما في المعادلة المبينة مع الشكل التالى:



3- طريقة ثنائي القطب – ثنائي القطب Dipole-Dipole Method :

في هذا التوزيع يتم وضع قطبي الجهد خارج قطبي التيار ويكون كل زوج له تباعد متبادل ثابت يساوى a وتكون المسافة بينهم كبيرة تساوى na. وهنا يمكن معاملة مصدر التيار كثنائي قطب كهربائي. وبقياس فرق الجهد ΔV بين أقطاب الجهد وشدة التيار المارة إلى داخل الأرض I أقطاب التيار يمكن حساب قيمة المقاومة النوعية الظاهرية ρa كما كما في المعادلة المبينة مع الشكل التالي. ويستخدم هذا التوزيع في قياس أو دراسة التغيرات الأفقية و الرأسية. لقياس التغيرات الأفقية يجب أن تبقى المسافة بين زوجي الأقطاب ثابتة. و لكن قياس التغيرات الرأسية مع العمق يجب أن تزداد المسافة بين زوجي الأقطاب بمعامل n = 1, 2, 3, 4, 5, 6…….n.



$$\rho = \pi \frac{V}{I} n(n+1)(n+2)a$$

س: لماذا تسمى المقاومة الناتجة بالمقاومة الظاهرية Apparent Resistivity وليس المقاومة الحقيقة True Resistivity:

تعبر المعادلات السابقة والممثلة للثلاث تنظيمات المختلفة لحساب المقاومة الحقيقية فقط لو كان الوسط الجيولوجي التحت سطحي وسطا متجانسا Homogeneous بصورة كاملة بحيث لا تتأثر قيمة هذه المقاومة عند تبديل أماكن أقطاب التيار والجهد. ولكن الواقع غير ذلك فإن المقاومة النوعية المقاسة تتغير مع تغير أماكن الأقطاب بمعنى أنه لو تم نقل أقطاب التيار حتى مع بقاء أقطاب الجهد ثابتة فسيتم الحصول على قيمة مختلفة للمقاومة النوعية وذلك نتيجة وجود اختلافات جانبية في المقاومة النوعية لطبقات الأرض. لهذا يطلق على المقاومة النوعية الناتجة من المعادلات الثلاث السابقة بالمقاومة الظاهرية.

طريقة الجهد الذاتيSELF-POTENTIAL

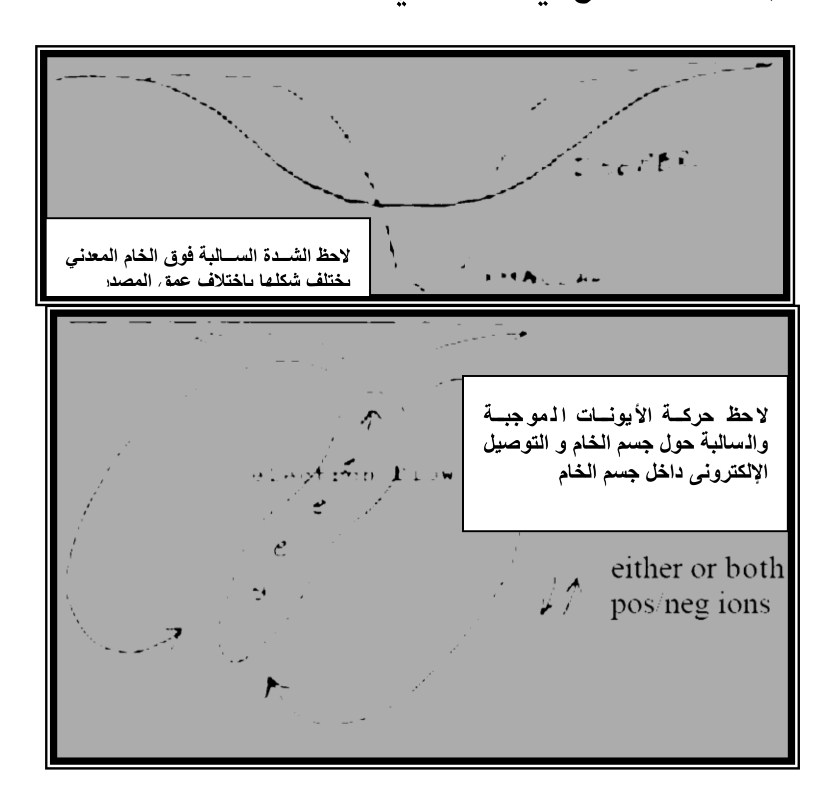
إن طريقة الجهد الذاتي SP هي الطريقة الوحيدة بين الطرق الكهربية التي لا تستخدم تيار اصطناعيا يرسل داخل الأرض. وتستند هذه الطريقة على قياس فرق الجهد الذي يوجد طبيعيا وتلقائيا داخل طبقات الأرض والناتج من التفاعلات الكهروكيميائية في الصخور والخامات المطمورة ويقاس بـ الميلى فولت.

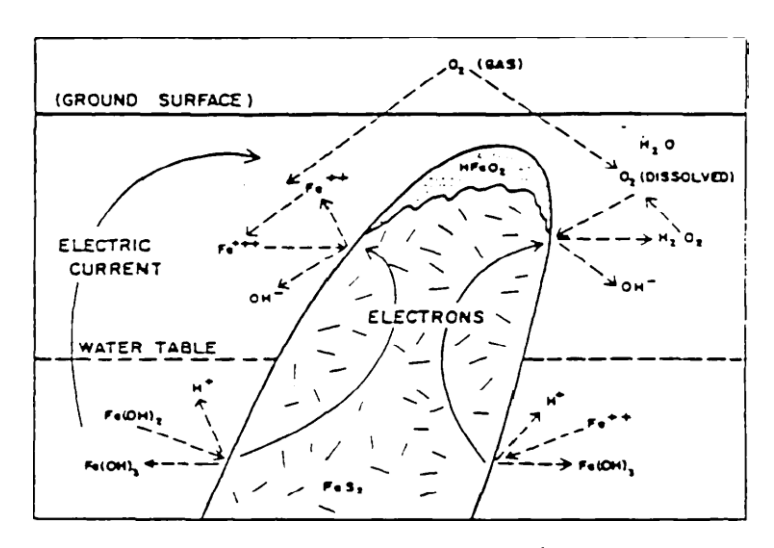
أصل الجهد الذاتي :

يمكن تقسيم الجهود التلقائية أو الذاتية الملحوظة في الأرض إلى نوعين رئيسيين:

أولا: جهد التمعدن Mineralization Potential: وينشأ هذا النوع من فرق الجهد عندما يتصرف الخام المعدني مثل الكبريتيدات والجرافيت الموجود في طبقات الأرض كبطارية جلفانية طبيعية لها طرف موجب و آخر سالب. ويحدث هذا عندما يقع جزء من الخام المعدني فوق مستوى المياه الجوفية وبالتالي يتأكسد سطحه بفقده إلكترونات (مكونا أيونات موجبة الشحنة) بينما يقع جزءه الآخر تحت مستوى المياه الجوفية وبالتالي يتعرض سطح المعدن للاختزال (مكونا أيونات سالبة الشحنة)، يؤدى هذا إلى سريان التيار الكهربي من طرف الخام المعدني إلى الطرف الآخر نتيجة حركة هذه الأيونات بينما داخل جسم الخام لكونه موصلا جيدا للكهربية،

تحمل تيار من المحاليل الكهربية المؤكسدة فوق منسوب الماء الجوفي إلى مختزلات موجودة أسفلها نتيجة حركة الإلكترونات الحرة داخل جسم المعدن وبالتالي يسرى التيار الكهربي مكونا شدة الجهد المقاسة فوق كتلة كبريتيد أو جرافيت والتي تكون دائما سالبة . كما هو موضح في الشكل التالي:





ولكن هذا التفسير أو هذا الافتراض يفشل في تفسير التالي:

الشدة التي تمثل الخام المعدني عندما يكون مغمور كلية تحت سطح الماء الجوفي.

لماذا تمنع طبقة الطين تكوين الجهد الذاتي للخام المعدني عندما تغطيه أو تعلوه.

كيفية تكوين الجهد الذاتي فوق المعادن رديئة التوصيل الكهربي Poor conductors .

ثانيا: الجهود الخلفية Background Potentials وهي:

1- جهد الانتشار أو وصلة السوائلLiquid-Junction or Diffusion Potential:

وهو الذي ينشأ نتيجة انتشار السوائل بين وسطين موصلين للكهربية نتيجة وجود اختلاف في تركيز الأملاح بينهما.

2- فرق الجهد الإنسيابي PotentialStreaming or Electrokinetic: وينشأ هذا الجهد نتيجة مرور السوائل ذات خواص كهربية مختلفة خلال الصخور المسامية المنفذة .

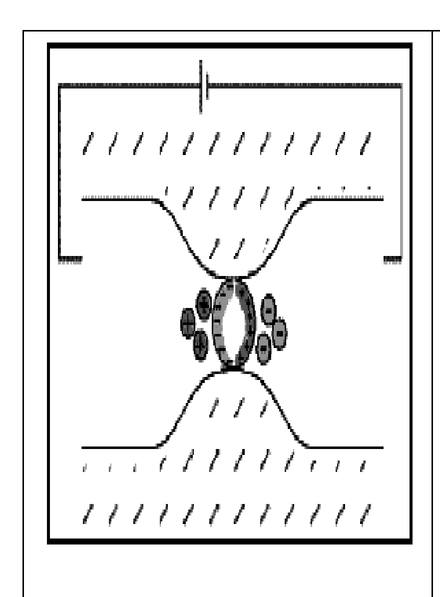
3- فرق الجهد الكهربي الحيوي Bioelectric Potential : وينشأ هذا النوع من الجهد نتيجة مرور السوائل في عملية التغذية الطبيعية في جذور النباتات.

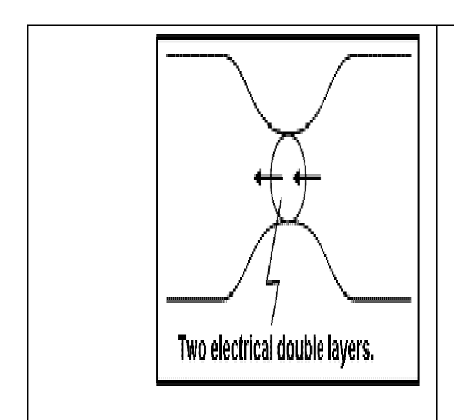
الإستقطاب المستحث Induced Polarization:

طريق الاستقطاب المستحث التي استعملت لأول مرة في أواخر الأربعينيات وبالرغم من قدمها إلا أنها مازالت تستخدم على نطاق واسع في البحث عن خامات الكبريتيدات المبعثرة Disseminated sulfide ores وإلى حد ما في البحث عن المياه الجوفية. و فيما يلي سيتم مناقشة وعرض الأساس الفيزيائي والجيولوجي لمصدر الإستقطاب المستحث في طبقات الأرض:

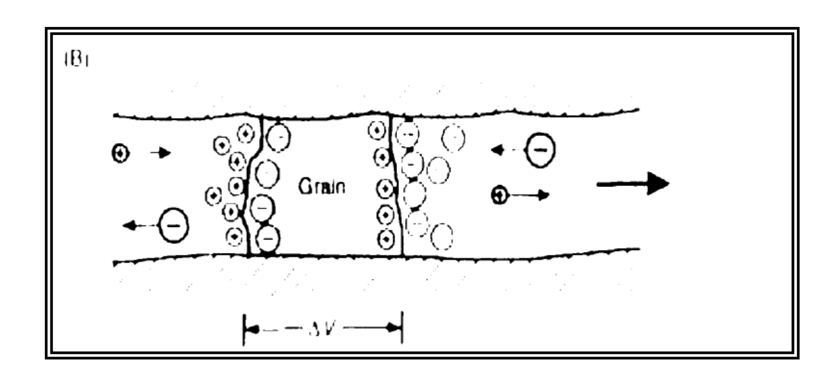
1- الاستقطاب القطبي Electrode Polarization : ويصاحب هذا النوع من الاستقطاب الحثى تواجد المعادن الموصلة للكهربية و يتناقص مع زيادة المسامسة الصخرية. فعند مرور تيار كهربي خلال صخرة حاوية على معادن فلزية، فإن التوصيل الأيوني يتعوق إلى حد كبير من قبل الحبيبات المعدنية

والتي يكون انسياب التيار فيها إلكترونيا. إن ذلك يقود إلى تراكم الأيونات في الحد الفاصل بين المعدن والمحلول مؤديا إلى نمو فولتية كهروكيميائية عن سطوح الحبيبات المعدنية كما هو موضح بالشكل التالي:

يحدث الاستقطاب القطبي عندما تسد المسام الصخرية بالحبيبات المعدنية . فإن التوصيل الأيوني يتعوق إلى حد كبير من قبل الحبيبات المعدنية والتي يكون انسياب التيار فيها إلكترونيا. إن ذلك يقود إلى تراكم الأيونات في الحد الفاصل بين المعدن والمحلول مؤديا إلى نمو فولتية كهروكيميائية عن سطوح الحبيبات المعدنية عندما يطبق مجال كهربي خارجي كما هو مبين بالشكل.	

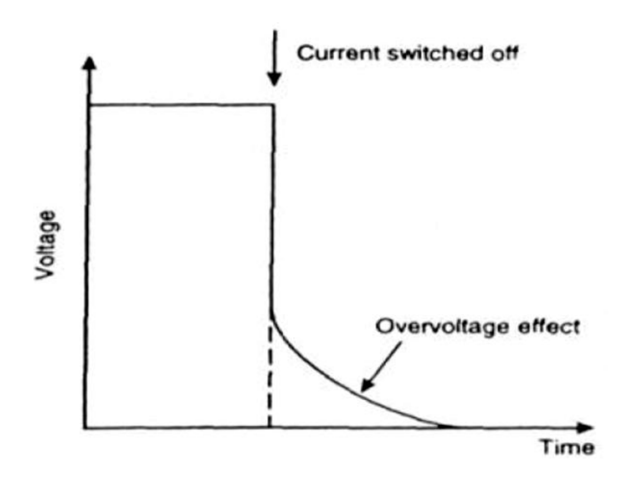
تكون النتيجة طبقتين كهربيتين مشحونتين على جانبي سطح الحبيبات المعدنية كما هو مبين بالشكل يؤدى إلى وجود جهد كهربي يقاس من على السطح.	

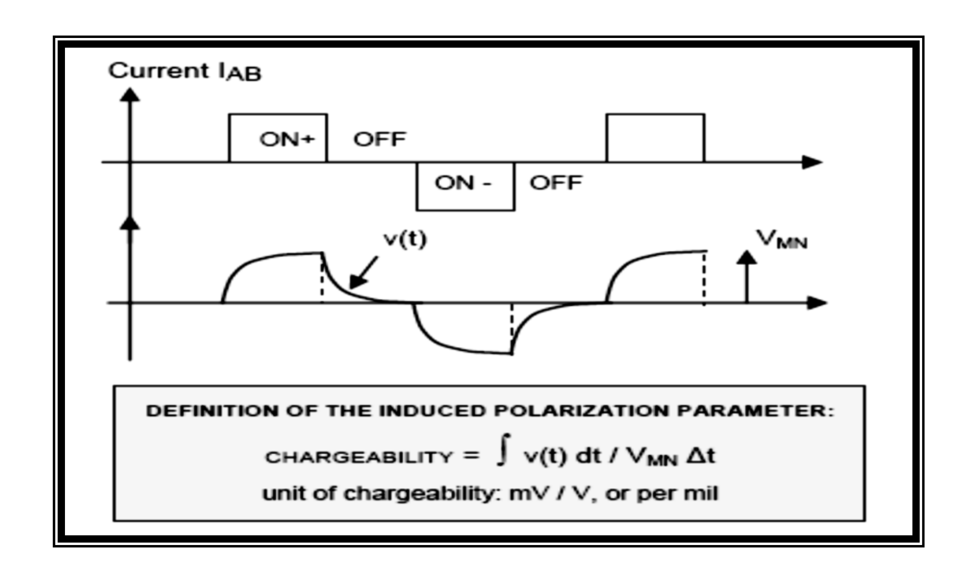
توضيح آخر لطريقة تكوين **Electrode Polarization** :



إن هذه العملية مشابهة لاستقطاب قطب وذلك عند غمس القطب في محلول إلكتروليتى. وعند انقطاع التيار الخارجي المسلط **Applied Field** تتبدد الفولنية الكهروكيميائية ولكنها لا تنخفض إلى الصفر آنيا.

ولكن لوحظ أن انحلال الفولتية يتغير مع الومن كما يظهر في الشكل التالي:





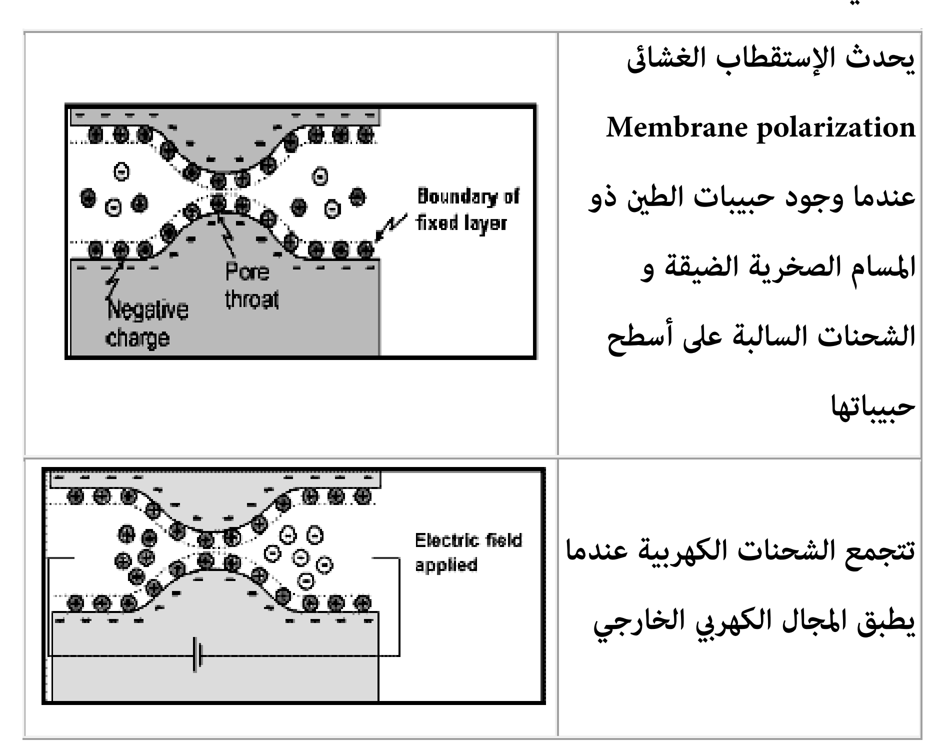
ويمكن قياسه كجزء من الفولتية V التي كانت موجودة عند مرور التيار. وتعطى النسبة بين السعة للجهد الإضافي بعد توقف التيار مباشرة إلى تلك (قيمة الجهد) بعد التوقف $\Delta V/V$ تعطى قياس التركيز للمعادن الفلزية في المواد التي يسرى خلالها التيار. وهذا باختصار مبدأ الاستقطاب المستحث أو IP .

س: هل يمكن ملاحظة الإستقطاب المستحث في حالة عدم وجود معادن فلزية في الصخر؟

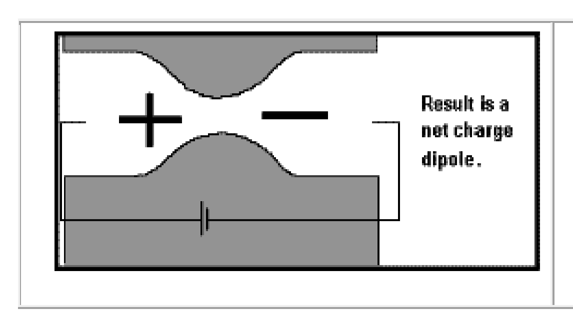
الإجابة: نعم يمكن. كيف؟

لوحظ أن الرواسب الحاملة للطين استقطابا مستحثا ملموسا يسمى الاستقطاب الغشائي Membrane Polarization : ويسمى الاستقطاب الطبيعي Normal IP وهو يصاحب تواجد معادن الطين في الصخر حيث أن سطح جسم الطين له شحنة سالبة تجزب الأيونات الموجبة من الإلكتروليت الموجود في المسامات (أنظر الشكل التالي). وكنتيجة لهذا التوزيع المستقطب للأيونات والمسمى بالاستقطاب الغشائي)، فإن إنسياب التيار يعوق، و عند توقف التيار المسلط تعيد الأيونات الموجبة توزيع نفسها للرجوع إلى وضع التعادل.

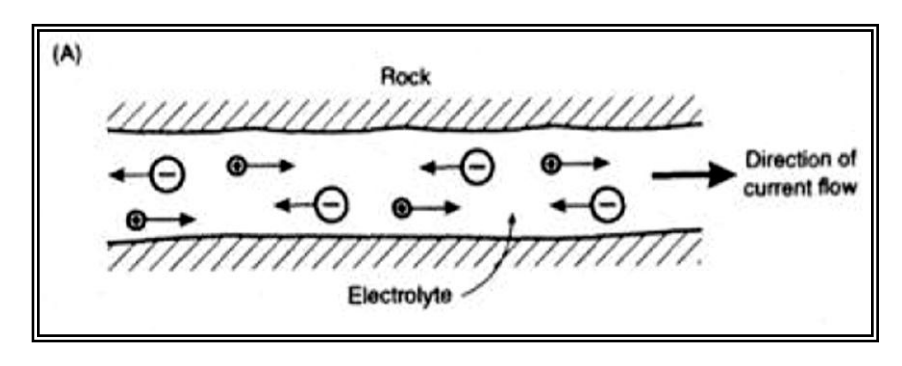
إن عملية إعادة التوزيع للأيونات تظهر فولتية منحلة على شكل IP. ويتناقص قيمة هذا الجهد إذا ذادت محتوى معادن الطين عن 10% وذلك بسبب نقص المسامية وبالتالي إنخفاض التوصيلية الكهربية.



يحدث الإستقطاب الغشائى **Membrane polarization** عندما وجود حبيبات الطين ذو المسام الصخرية الضيقة و الشحنات السالبة على أسطح حبيباتها	
تتجمع الشحنات الكهربية عندما يطبق المجال الكهربي الخارجي	

	ينتج شحنة ثنائية (موجب و سالب) على جانبي الاختناق في الثغور أو المسام منتجا جهدا يمكن قياسه من على السطح

توضيح آخر لطريقة تكوين **Membrane Polarization** :



ملحوظة هامة:

إن الاستقطاب المستحث سواء كان قطبيا أم غشائيا ظاهرة سطحية بالأساس أي تتم على أسطح حبيبات الصخر والمعدن ولذلك فإن تأثيرها سيكون أكبر فيما لو كان الخام الفلزي أو الطين مبعثرا بدلا من كونه متماسكا.

الفصل الثالث المصادر والمجالات الكهربائية والمغناطيسية الثابتة مع الزمن Static Sources, Electric and Magnetic Fields

شهدت العقود الأخيرة تقدماً سريعاً في مسارات الهندسة الكهربائية المختلفة وخاصة مساري الاتصالات والحاسبات بحيث إن البيئة العامة أصبحت بحراً من الإشارات الكهربائية والمغناطيسية. ومن هذه الإشارات على سبيل المثال لا الحصر ما يلي:-

المجالات الناتجة عن خطوط الضغط المنخفض والمتوسط والعالي والتي تغذي المدن والتجمعات السكانية والمصانع والبيوت .

الإشارات الناتجة عن المحطات الإذاعية والتلفازية وأجهزة الاتصالات المتنقلة والثابتة.

الإشعاعات الناتجة عن أجهزة الحاسوب الشخصية والتي تشهد نموا مطرداً وتزداد سرعتها بشكل يكاد يكون قياسياً.

المجالات الكهربائية والمغناطيسية التي تولدها أجهزة التلفاز والأجهزة المختلفة الأخرى التي باتت تملأ البيوت العصرية. وقد يكون مستوى هذه المجالات الناتجة عن بعض هذه الأجهزة مرتفعاً بعض الشيء لدرجة قد يؤثر على صحة الإنسان.

الإشعاعات الناتجة عن أنظمة الاتصالات الأخرى.

وهذا يجعل من الضرورة بمكان التعرف على الإشارات والمجالات الكهربائية والمغناطيسية (الكهرومغناطيسية) وفهم ارتباطها مع بعضها ومع المصادر التي تنتجها. سيتم في هذا الكتاب محاولة وضع الأسس الضرورية لموضوع الكهرومغناطيسية الهندسية ويكون التركيز بشكل رئيسي على المجالات المتغيرة مع الزمن، إلا أنه لابد من أن يتم تقديم الأساس الضروري واللازم لهذا الموضوع في صورة المصادر والمجالات الكهربائية والمغناطيسية الثابتة مع الزمن لأنها تعتبر متطلباً أساسياً لموضوع هذا الكتاب. سيقدم شرحاً مختصراً لكل من المصادر والمجالات الكهربائية الثابتة مع الزمن وكذلك المصادر والمجالات المغناطيسية الثابتة مع الزمن. ويشكل هذا الفصل الأساس للأبواب الأخرى ويتم تقسيمه إلى خمسة أجزاء. يغطي الجزء الأول المصادر والمجالات الكهربائية الثابتة مع الزمن ويتم تقديم المصادر الكهربائية (الشحنات) وما ينتج عنها من قوى ومجالات وجهد كهربائي، ويتم كذلك بحث خصائص المواد العازلة واستقطابها وشرح المواسع وطريقة إيجاد سعته. أما في الجزء الثاني فإنه يعالج التيار المستمر (الثابت مع الزمن) والخصائص الموصيليه للأوساط المختلفة. أما الجزء الثالث فيتم تقديم المصادر المغناطيسية (التيارات)

وما ينتج عنها من قوى ومجالات وجهد مغناطيسي وسيتم بحث خصائص المواد المغناطيسية وإيجاد المحاثة. و يغطي الجزء الرابع تفاعل الشحنات مع المجالات الكهربائية والمغناطيسية. أما الجزء الخامس فيقدم الصور في المصادر الكهربائية.

المصادر والمجالات الكهربائية الثابتة مع الزمن

إن المصادر والمجالات الكهربائية الناتجة عنها لا تكون بالمفهوم المطلق ثابتة مع الزمن (أو غير متحركة) وإنما تكون شبه ثابتة. ويسهل افتراض أنها ثابتة مع الزمن التعامل معها في هذه المرحلة. وسيتم، لاحقاً في هذا الفصل، معالجة خاصة للمصادر المتحركة. ولكن سيتم أولاً تعريف المصادر (الشحنات) وبعدها يتم الانتقال إلى إيجاد المجالات الكهربائية الناتجة ومن ثم إيجاد الآليات التي تربط بينهما.

الشحنات الكهربائية Electric Charges

تتكون المواد من ذرات وتتكون الذرة من نواة تحوي على نيترونات وهي أجسام غير مشحونة وبروتونات،وزن البروتون1.67×10^{-27} kg، وهـي أجسام اصطلح علـى اعتبار أن شحنتهـا موجبة (+) . ويدور حول النواة مجموعة من الإلكترونات في مدارات مختلفة ، وزن الإلكترون 9.11×10^{-31} kg،

وهي أجسام اصطلح على أخذ شحنتها سالبة (-) ، وتستخدم وحدة الكولومب Cللتعبير عن قيمة هذه الشحنات علماً بأن القيمة العددية لشحنة البروتون هي نفسها لشحنة الإلكترون أو 1.67×10^{-19} C . وتمثل هذه البروتونات والإلكترونات الأساس للشحنات الكهربائية(أو المصادر الكهربائية) وتأتي هذه المصادر (الشحنات) بأشكال مختلفة كما يلي:-

شحنة نقطية (Point Charge) :- وهي شحنة (أو عدة شحنات) مركزة عند نقطة (أو مجموعة من النقاط) ويرمز لها بالرمز qووحداتها كولومب c.

شحنة خطية (Line Charge) :- وهي شحنة مقدارها، مثلاً، q c موزعة بشكل منتظم أو غير منتظم على خطLويعبر عنها بكثافة الشحنة الخطية ويرمز لها بالرمزρLووحداتها كولومب/متر أو c/m.

شحنة سطحية (Surface Charge) :- وهي شحنة مقدارها، مثلاً، q cموزعة بشكل منتظم أو غير منتظم على سطحsويعبر عنها بكثافة الشحنة السطحية ويرمز لها بالرمزρsووحداتها كولومب/متر مربع أوc/m2.

شحنة حجمية (Volume Charge) :- وهي شحنة مقدارها، q c موزعة بشكل منتظم أو غير منتظم في حجم v و يعبر عنها بكثافة الشحنة الحجمية ويرمز لها بالرمزρvووحداتها كولومب/متر مكعب أوc/m3.

ويبين الشكل (1-1) هذه الأنماط المختلفة من الشحنات الكهربائية. وتجدر الإشارة إلى أن الشحنات المتشابهة (موجبة وموجبة أو سالبة وسالبة) تتنافر وأن الشحنات المختلفة (موجبة وسالبة أو سالبة وموجبة) تتجاذب.

القوة الكهربائية والمجال الكهربائي

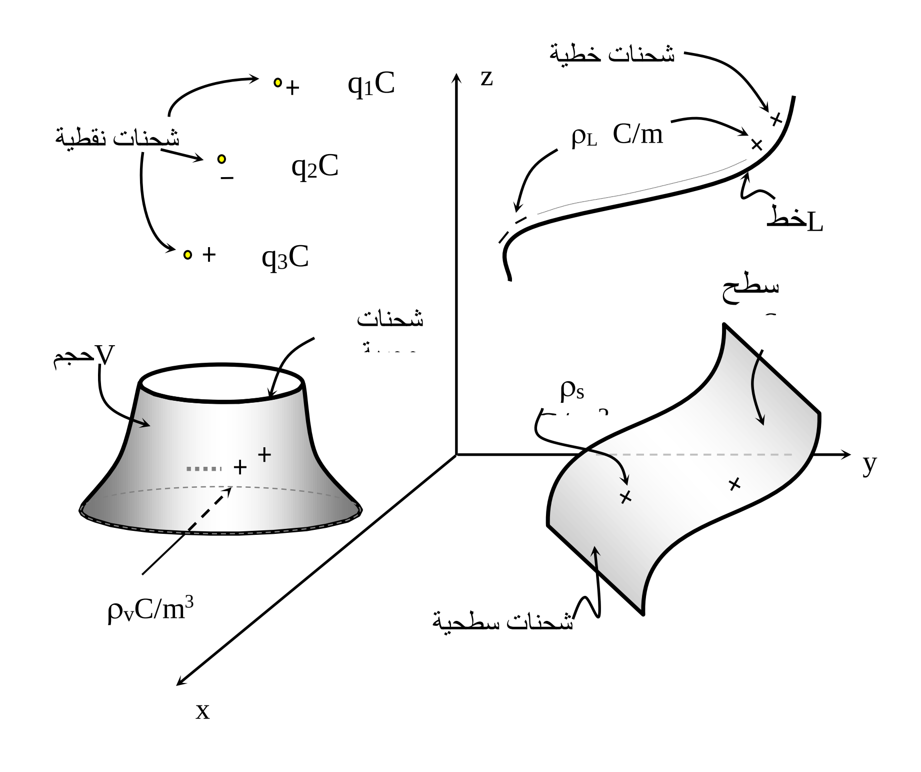
Electric Force and Field

يمكن أن يتم فعلياً قياس ما ينتج عن الشحنات الكهربائية وبالتالي فإن معظم القوانين التي تضبط العلاقة بين الشحنات وما ينتج عنها هي في أساسها تجارب يمكن تصميمها وإجراؤها وأولها قانون كولومب (Coloumb Law) الذي يحدد القوة الكهربائية F(Electric Force) (سيتم استخدام حرفاً داكناً لتمثيل الكميات المتجهة) بين شحنتين q1c و q2c تفصل بينهما مسافة R12، أنظر الشكل (1-2)، وهذه القوة الكهربائية تكون كما يلي:-

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{q_1 \; q_2}{4\,\pi\,\varepsilon\,R_{12}^2}\;\mathbf{a}_{R_{12}} \qquad \text{N} \qquad \textbf{(1-1)}$$

حيث إن F12 هي القوة التي تؤثر بها الشحنة q1 على الشحنة q2 علماً بأن F12 = - F21، و $R_{12} = |\mathbf{R}_{12}| = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1|$ **هي المسافة التي تفصل بين الشحنتين q1 و q2 و** $\mathbf{a}_{R12}$ **يمثل متجه وحدة طول و** $\mathbf{r}_1$ **و** $\mathbf{r}_2$ **يمثلان متجهات موضعية و ε هو ثابت الوسط أو سماحيته وتكون قيمته للفراغ (أو للهواء)**

$$\varepsilon_0 = 10^{-9} / (36\ \pi) \quad F/m$$.



الشكـل(1-1):-الأشكال المختلفة للشحنات الكهربائية:-الشحنات النقطيةq1c و q3cوq2c والشحنة الخطية ρLC/m والشحنة السطحيةρs c/m2 والشحنة الحجمية ρv c/m3.

ويمكن من الشكل (1-2) كتابة $\mathbf{r}_1$ و $\mathbf{r}_2$ و $\mathbf{R}_{12}$ و $\mathbf{a}_{R12}$ باستخدام الإحداثيات الكارتيزية والأسطوانية والكروية كما يلي:-

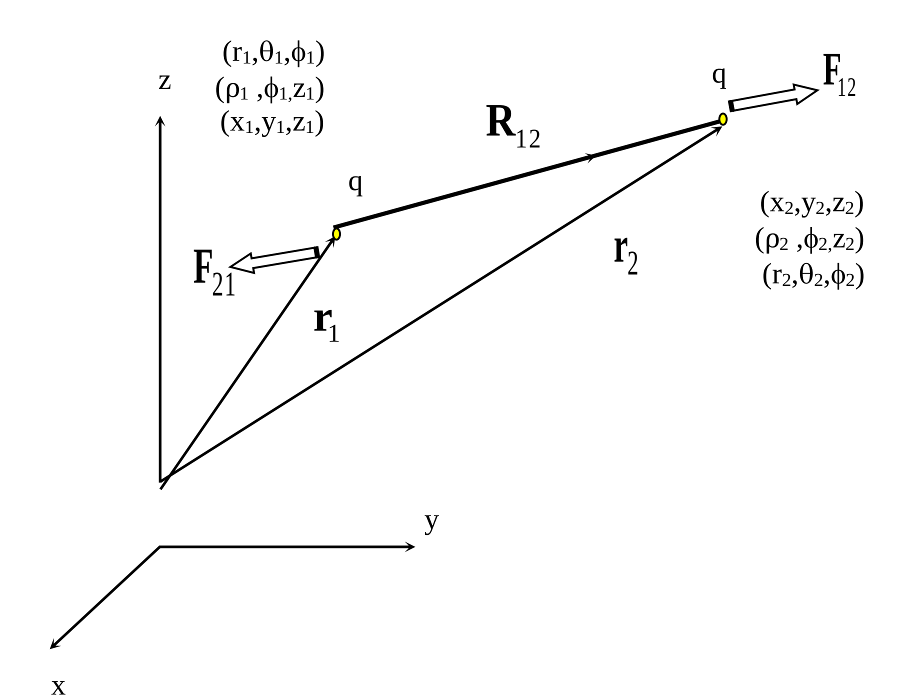
$$\mathbf{r}_{1,2} = x_{1,2}\,\mathbf{a}_x + y_{1,2}\,\mathbf{a}_y + z_{1,2}\,\mathbf{a}_z = r_{1,2}\,\mathbf{a}_{r_{1,2}} + z_{1,2}\,\mathbf{a}_z = r_{1,2}\,\mathbf{a}_{r_{1,2}}$$

$$= \rho_{1,2}\cos\phi_{1,2}\,\mathbf{a}_x + \rho_{1,2}\sin\phi_{1,2}\,\mathbf{a}_y + z_{1,2}\,\mathbf{a}_z$$

$$= r_{1,2}\sin\theta_{1,2}\cos\phi_{1,2}\,\mathbf{a}_x + r_{1,2}\sin\theta_{1,2}\sin\theta_{1,2}\,\mathbf{a}_y + r_{1,2}\cos\theta_{1,2}\,\mathbf{a}_z$$

$$R_{12} = |\mathbf{r}_2 - \mathbf{r}_1| = \sqrt{(x_2 - x_1)^2 + (y_2 - y_1)^2 + (z_2 - z_1)^2}$$

$$\mathbf{a}_{R_{12}} = [(x_2 - x_1)\,\mathbf{a}_x + (y_2 - y_1)\,\mathbf{a}_y + (z_2 - z_1)\,\mathbf{a}_z]/R_{12}$$



الشكل (1-2):- القوة الكهربائيـة$\mathbf{F}_{12}$بين شحنتينq_1 وq_2 تفصل بينهما مسافة R_{12}

وتعرف العلاقة المبينة في المعادلة (1-1) بقانون التربيع العكسي

وتعرف العلاقة المبينة في المعادلة(1-1) بقانون التربيع العكسي ويتكرر هذا القانون في المصادر والمجالات المغناطيسية وقوى الجاذبية ومسائل فيزيائية أخرى.

وتبين هذه العلاقة أن هناك تماثلاً في ناتج الشحنة النقطية q1 (في هذه الحالة)،

ويتوزع هذا الناتج بشكل منتظم على سطح كرة مساحتها $4\pi R_{12}^2 \ \ m^2$ وتؤثر هذه الشحنة بشكل طردي على الشحنة النقطية الأخرى q2 وذلك كما تبينه العلاقة المذكورة.

يتم الآن تعريف المجال الكهربائي(E (Electric Field على أنه القوة الكهربائية لكل وحدة شحنة أو أن المجـال الكهربائي E1 عند النقطـة(x2, y2, z2)الناتج عن الشحنة q1 الموضوعة عند النقطة (x1, y1, z1) هو كما يلي:-

$$\mathbf{E}_1 = \frac{\mathbf{F}_{12}}{q_2} = \frac{q_1}{4\pi\varepsilon R_{12}} \mathbf{a}_{R12} \qquad V/m$$

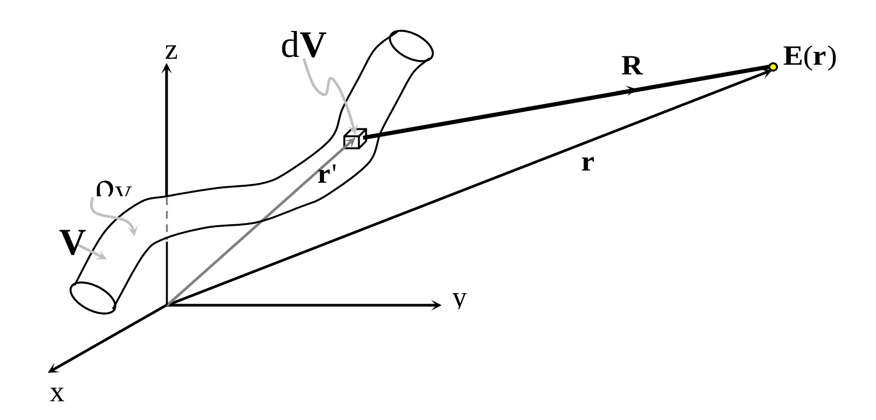
(2-1)

وتكون وحداته N/c أو v/m. وإذا كان هناك شحنة حجمية موجودة في الحجم V' وكثافتها هي ρ_V كما هو مبين في الشكل (1-3) فإن المجال الكهربائي الناتج عند النقطة(x, y, z) يكون كما يلي:-

$$\mathbf{E(r)} = \iiint_{V'} \frac{\rho_V(r')\ dV'}{4\pi\varepsilon R^2} \mathbf{a}_R \qquad V/m$$

(3-1)

حيث إن $R = |\mathbf{r} - \mathbf{r}'|$ و $\mathbf{a}_R = \mathbf{R} / |\mathbf{R}|$.



الشكل (1-3):-المجال الكهربائي الناتج عن شحنة حجمية.

مثال (1-1):- يبين الشكل (1-4) ثلاث شحنات نقطية موضوعة في الفراغ، الأولىq1 = 1 nc عند النقطة (0 ,1, 0)والثانيةq2 = - 2 ncعند النقطة (0, 0, 0)والثالثة q3 = 1 nc عند النقطة (i):-(0 ,0 ,1-)أوجد القوة التي تؤثر بها الشحنة الأولى على كل من الشحنة الثانية والثالثة. (ii)أوجد ناتج القوة التي تؤثر بها الشحنة الثانية والشحنة الثالثة على الشحنة الأولى.(iii)أوجد المجال الكهربائي الناتج عن هذه الشحنات عند النقطة (x, y, z) P1والنقطة (0,0,1) P2 والنقطة P3 (2,0,0).

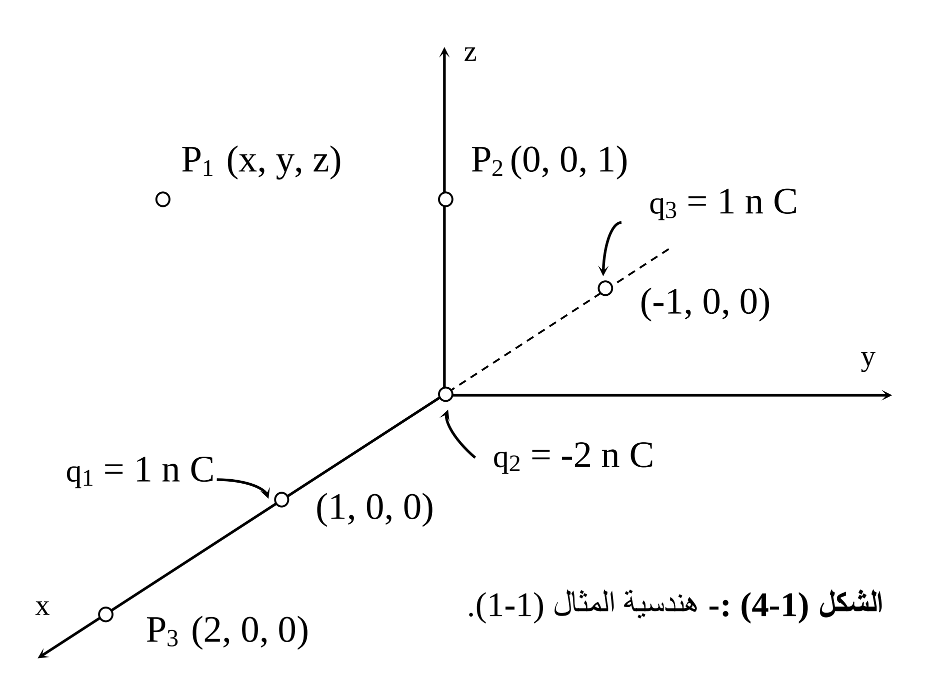
الحـــل:-

(i) القوة التي تؤثر بها الشحنة الأولى على الثانية

$$\mathbf{F}_{12} = \frac{(1\times 10^{-9})\,(-2\ \times 10^{-9})\,(-\mathbf{a}_x)}{4\,\pi\times(10^{-9}/36\,\pi)\ \times 1^2} = 18\,\mathbf{a}_x \qquad \text{nN}$$

القوة التي تؤثر بها الشحنة الأولى على الثالثة

$$\mathbf{F}_{13} = \frac{(1\times 10^{-9})\,(1\ \times 10^{-9})\,(-\mathbf{a}_x)}{4\,\pi\times(10^{-9}/36\,\pi)\times 2^2} = -\,2.25\ \mathbf{a}_x \qquad \text{nN}$$



الشكل (4-1) :- هندسية المثال (1-1).

(ii) أما ناتج القوة التي تؤثر بها الشحنتين الثانية والثالثة على الشحنة الأولى فهي كما يلي :-

$$\mathbf{F} = \mathbf{F}_{21} + \mathbf{F}_{31} = -\mathbf{F}_{12} - \mathbf{F}_{13} = -18\,\mathbf{a}_x + 2.25\,\mathbf{a}_x = 15.75\,\mathbf{a}_x \quad \text{nN}$$

(iii) المجال الكهربائي الكلي عند النقطة P1 هو المجموع الاتجاهي للمجال الكهربائي الناتج عن كل شحنة على حدة، أو

$$\mathbf{E}(x, y, z) = \frac{10^{-9}}{4\pi(10^{-9}/36\pi)}\left[\frac{(x-1)\,\mathbf{a}_x + y\,\mathbf{a}_y + z\,\mathbf{a}_z}{\left[(x-1)^2 + y^2 + z^2\right]^{3/2}}\right.$$

$$\left. -\frac{2\,(x\,\mathbf{a}_x + y\,\mathbf{a}_y + z\,\mathbf{a}_{z)}}{\left[(x^2 + y^2 + z^2\right]^{3/2}} + \frac{(x+1)\,\mathbf{a}_x + y\,\mathbf{a}_y + z\,\mathbf{a}_{z)}}{\left[(x+1)^2 + y^2 + z^2\right]^{3/2}}\right] \text{V/m}$$

أما المجال الكهربائي الكلي عند النقطة P2 كما يلي:-

$$\mathbf{E}(0,0,1) = 9\left[(-\mathbf{a}_x + \mathbf{a}_z)/(2\sqrt{2}) - 2\mathbf{a}_z + (\mathbf{a}_x + \mathbf{a}_z)/2\sqrt{2}\right]$$

$$= -11.64\,\mathbf{a}_z \quad V/m$$

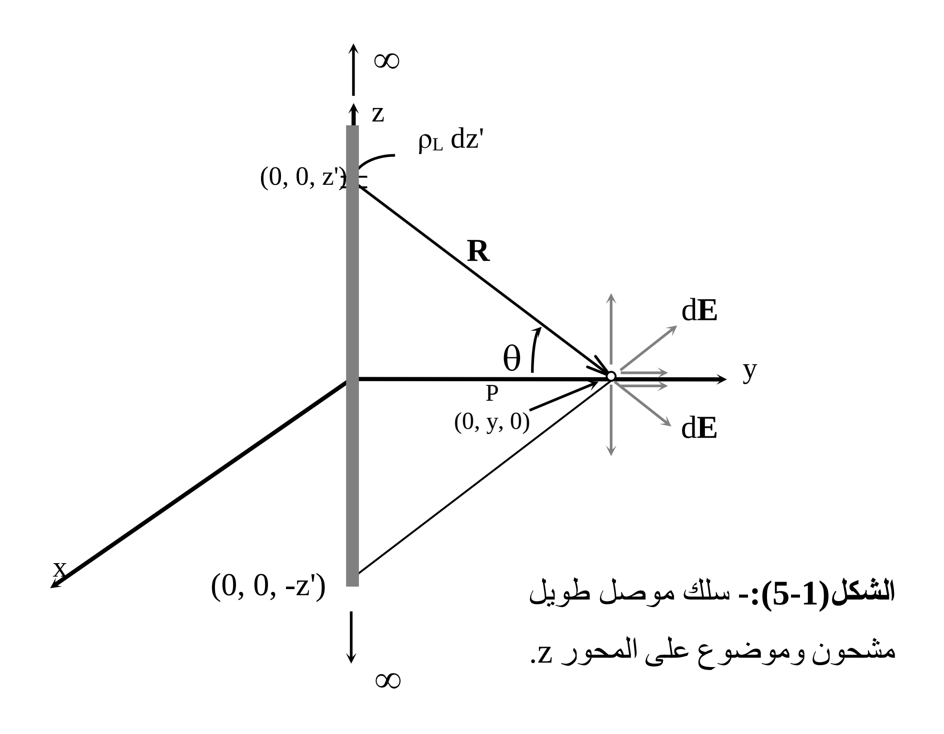
ويكون المجال الكهربائي الكلي عند النقطة P3كما يلي:-

$$\mathbf{E}\ (2,0,0) = 9\left[(\mathbf{a}_x - 0.5\,\mathbf{a}_x + 0.11\,\mathbf{a}_x) = 5.5\,\mathbf{a}_x \quad V/m\right.$$

مثال (1-2):-يبين الشكل (1-5) سلكاً موصلاً طويلاً يحمل شحنة خطية كثافتها ρL C/m وموضوع باتجاه المحور zفي الهواء، أوجد المجال الكهربائي الناتج عن هذا السلك عند النقطة (p (0, y, 0.

الحـــل :-

إذا أخذ جزءٌ صغير من السلك dz' والذي يحمل شحنة مقدارها $\rho_L dz'$ C فإن المجال الكهربائيdE الناتج يكون كما يلي :-



الشكل(5-1):- سلك موصل طويل مشحون وموضوع على المحور z.

$$d\mathbf{E}\,(0, y, 0) = \frac{\rho_L \; dz'}{4\,\pi\,\varepsilon_0\, R^2}\,\mathbf{a}_R \qquad\qquad V/m$$

حيث إن $R = (y^2 + z'^2)^{1/2}$ و $\mathbf{a}_r = (y\,\mathbf{a}_y - z'\,\mathbf{a}_z)/(y^2 + z'^2)^{1/2}$.

أو أن المجال الكهربائي الكلي الناتج عن السلك يكون كما يلي :-

$$\mathbf{E}\,(0, y, 0) = \frac{\rho_L}{4\,\pi\,\varepsilon_0} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{(y\;\mathbf{a}_y - z'\,\mathbf{a}_z)}{(y^2 + z'^2)^{3/2}}\,dz' \qquad V/m$$

ومن التماثل في هذه المسألة فإن المجال الكهربائي سيكون له عنصر في اتجاه ay فقط (يلاحظ أن التكامل الثاني يتم على دالة مفردة وبالتالي فإن نتيجته تكون صفراً) أو أن $\mathbf{E} = E_y\mathbf{a}_y$ أو

$$E_y\,(0, y, 0) = \frac{2\,\rho_L\,y}{4\,\pi\,\varepsilon_0} \int_{0}^{\infty} \frac{dz'}{(y^2 + z'^2)^{3/2}}$$

وتستخدم طريقة التعويض لإجراء هذا التكامل الأخير أو باستخدام $z' = y\tan\theta$ وبالتالي فإن

$dz' = y d\theta / \cos^2\theta$ و $(y^2 + z'^2)^{3/2} = y^3/\cos^2\theta$ ، أو

$$\int_0^{\infty} \frac{dz'}{(y^2 + z'^2)^{3/2}} = \frac{1}{y^2} \int_0^{\pi/2} \cos\theta \, d\theta = 1/y^2$$

ويصبح المجال الكهربائي عند النقطة (0,y,0) كما يلي:-

$$E_y(0, y, 0) = \rho_L / (2\pi\varepsilon_0 y) \quad V/m$$

إذا استخدمت الإحداثيات الأسطوانية في حل هذه المسألة فإن المجال الكهربائي

الناتج يكون فقط باتجاه $a\rho$ ويكون $E_\rho(r, \phi, z) = \dfrac{\rho_L}{2\pi\varepsilon_0\rho} \quad V/m$ **حيث**

إن ρ هي المسافة التي تفصل النقطة المراد إيجاد المجال الكهربائي عندها عن السلك في الإحداثيات الأسطوانية.

الجهد الكهربائي (Electric Potential)

يعرف الجهد الكهربائي بأنه كمية الشغل المبذول لنقل وحدة شحنة موجبة من نقطة إلى أخرى بوجود مجالٍ كهربائي. ويبين الشكل (1-6) وجود شحنة نقطية+q وخطوط مجالها الكهربائي ووحدة شحنة موجبة تقع عند النقطة P1(r1).يلاحظ أنه سيتم بذل جهدٍ موجبٍ

إذا ما حركت وحدة الشحنة الموجبة من النقطة(P1(r1 إلى النقطة(P2(r2 أي باتجاه معاكس لاتجاه خطوط المجال الكهربائي. كذلك فإنه سيتم بذل جهدٍ سالبٍ إذا ما حُركت وحدة الشحنة الموجبة من النقطة(P1(r1إلى النقطة $P'_2(\mathbf{r}'_2)$ أي باتجاه خطوط المجال الكهربائي. ويعطى الجهد الكهربائي بالعلاقة التالية:-

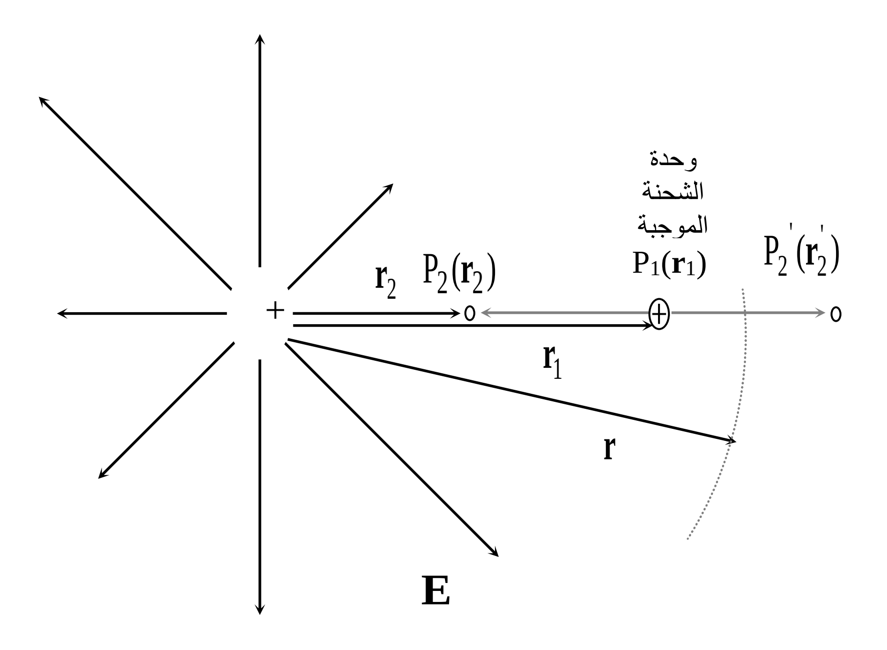
$$V_{12} = -\int_1^2 \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L} \quad \mathbf{v} \qquad \mathbf{(4\text{-}1)}$$

وتأتي الإشارة السالبة للتعبير عن أن بذل جهد موجب ينتج من تحريك وحدة الشحنة الموجبة باتجاه معاكس لاتجاه خطوط المجال الكهربائيE. ويؤكد الضرب النقطي(●) على أن الجهد سيكون بأعلى قيمة له إذا كانتdE وdL متوازيان ويكون صفراً إذا كانت حركة وحدة الشحنة باتجاه عمودي على خطوط المجال الكهربائي. أما dLفتمثل وحدة الطول التفاضلية أو

$d\mathbf{L} = dx\,\mathbf{a}_x + dy\,\mathbf{a}_y + dz\,\mathbf{a}_z$ **للإحداثيات الكارتيزية و**

$d\mathbf{L} = d\rho\,\mathbf{a}_\rho + \rho d\phi\,\mathbf{a}_\phi + dz\,\mathbf{a}_z$ **للإحداثيات الأسطوانية و**

$d\mathbf{L} = dr\,\mathbf{a}_r + r d\theta\,\mathbf{a}_\theta + r\sin\theta\,d\phi\,\mathbf{a}_\phi$ **للإحداثيات الكروية.**



الشكل (1-6):- شحنة نقطية q+ وخطوط مجالها الكهربائي وحركة وحدة الشحنة الموجبة.

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\,\mathbf{a}_r \qquad V/m$$

ومن الشكل (1-6) فإن dL = dr ar والمجال الكهربائي

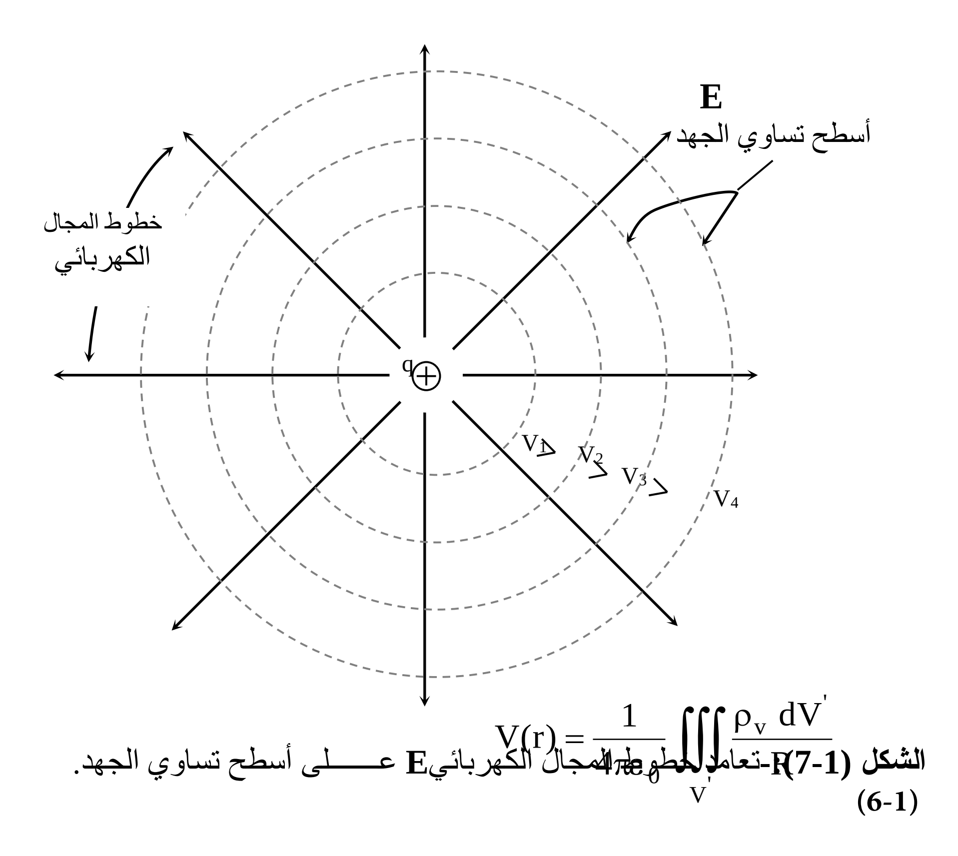
وبالتالي فإن الجهد الكهربائي V12يصبح كما يلي:-

$$V_{12} = -\int_{r_1}^{r_2} \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r^2}\, dr = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left(\frac{1}{r_2} - \frac{1}{r_1}\right) \qquad V$$

وإذا كانت $r = r2$ و $r1 \rightarrow \infty$ فإن الجهد الكهربائي للنقطة $P(r)$ مقارنة بنقطة يكون عندها الجهد مساوياً لصفر هو

$$V(r) = \frac{q}{4 \pi \varepsilon_0 r} \qquad V \qquad (5\text{-}1)$$

وتمثل العلاقة الأخيرة قيمة الجهد عند أي نقطة على سطح كرة نصف قطرها r ويكون جهد أي نقطة على سطحها مساوياً $q/(4 \pi \varepsilon_0 r) \quad V$ ويسمى هذا بسطح تساوي الجهد. ويلاحظ من الشكل (1-7) أن خطوط المجال الكهربائي تكون عمودية على هذا السطح وهذه قاعدة عامة مفادها أن خطوط المجال الكهربائي تكون دائماً عمودية على أسطح تساوي الجهد. ويمكن إعادة كتابة المعادلة (1-5) إذا كانت الشحنة موزعة في حجم كما يلي:-



$$V(r) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0} \iiint_{V'} \frac{\rho_v \, dV'}{R} \qquad (6-1)$$

الشكل (7-1)- تعامد خطوط المجال الكهربائي **E** عـــــلى أسطح تساوي الجهد.

حيث إن R تمثل المسافة بين النقطة التي يكون عندها $\rho_v \, dV'$ والنقطة التي يتم حساب جهدها. ويلاحظ أن العلاقة التي تحدد الجهد هي أبسط من تلك التي تحدد المجال الكهربائي إضافة إلى أن الجهد كميـة قياسية في حين إن المجال كمية متجهة

وبالتالي قد يكون من السهل، في حالات عدة وخاصة تلك التي تفتقد إلى التماثل، إيجاد الجهد ومن ثم (سيتم بيان ذلك فيما بعد) يتم استنتاج المجال الكهربائي.

مثال (1-3):-في المثال(1-2) أوجد فرق الجهد V12الناتج بين نقطتين الأولى تقع على بعدρ1من السلك والثانية تقع على بعدρ2من السلك علماً بأن ρ1 <ρ2إذا كان طول السلك 2Lوموضوع بشكل متماثل على المحورz، بين z = - Lو z = L، فأوجد جهد النقطة(0, y, 0)إذا كانت كثافة الشحنة الخطية له $\rho_L \; C/m$.

الحـــل:-

بما أن المجال الكهربائي لهذا السلك هو $E_\rho = \rho_L/(2\pi\varepsilon_0\rho)$ **فإن فرق الجهدV12 بين نقطتين(ρ = ρ1 ρ = ρ2)هو كما يلي:-**

$$V_{12} = -\int \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L} = -\int \frac{\rho_L}{2\pi\varepsilon_0\rho}\mathbf{a}_\rho \bullet (d\rho\,\mathbf{a}_\rho + \rho d\phi\,\mathbf{a}_\phi + dz\,\mathbf{a}_z)$$

$$= -\frac{\rho_L}{2\pi\varepsilon_0}\int_{r_1}^{r_2}\frac{d\rho}{\rho} = \frac{\rho_L}{2\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{\rho_1}{\rho_2}\right) \qquad V$$

أما في حالة السلك الواقع في المدى $-L \le z \le L$ **فقط فسيكون من الأسهل إيجاد الجهد V عند النقطة (0, y, 0) مباشرة كما يلي:-**

$$V(0, y, 0) = \frac{1}{4\pi\varepsilon_0}\int_{-L}^{L}\frac{\rho_L\, dz'}{R} = \frac{\rho_L}{4\pi\varepsilon_0}\int_{-L}^{L}\frac{dz'}{\sqrt{y^2 + z'^2}}$$

يتم إجراء هذا التكامل بطريقة التعويض $z' = y\tan\theta$ **أو**

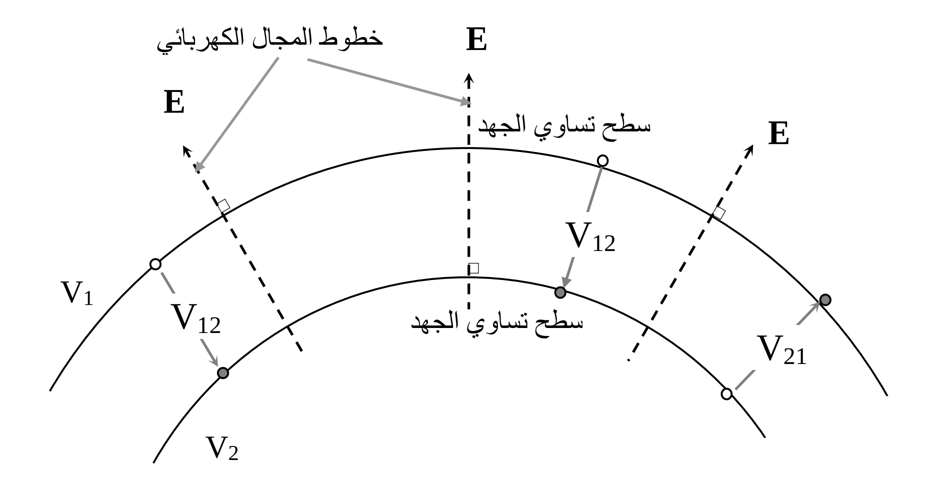
$dz' = y\, d\theta / \cos^2\theta$ **وكذلك** $\sqrt{y^2 + z'^2} = y/\cos\theta$ **وبالتالي فإن الجهد V يصبح كما يلي :-**

$$V(0,y,0) = \frac{\rho_L}{4\pi\varepsilon_0}\int_{-\theta_1}^{\theta_1}\frac{d\theta}{\cos\theta} = \frac{\rho_L}{4\pi\varepsilon_0}\ln\left(\frac{1+\sin\theta_1}{1-\sin\theta_1}\right)$$

حيث إن $\theta_1 = \tan^{-1}\left(\frac{L}{y}\right)$ **أو**

$$V(0, y,0) = \frac{\rho_L}{4\pi\varepsilon_o}\ln\left(\frac{\sqrt{L^2 + y^2} + L}{\sqrt{L^2 + y^2} - L}\right) \; V$$

يلاحظ مما سبق أن خطوط المجال الكهربائي تكون متعامدة على أسطح تساوي الجهد وبالتالي وبالنظر إلى الشكل (1-8) فإن فرق الجهد بين أي نقطة على سطح تساوي الجهد V1 وأى نقطة أخرى على سطح تساوي الجهد V2 يكون V1 - V2 أو V1 - V2. وبالتالي فليس لتفاصيل المسار بين نقطتين أثر على فرق الجهد بينهما وإنما فقط جهدي نقطتي البداية والنهائية. ونظراً لأن فرق الجهد بين نقطتين هو ناتج عن ضرب نقطي بينEوdL فإنه سيكون بقيمته العظمى عندما يكون الخط الممثل للمجال الكهربائي E موازياً للخط الممثل للمسار dLأو عندما يكون dLعمودياً على سطح تساوي الجهد. ويكون صفراً عندما يكون Eعمودياً على المسارdL أو عندما يكون المسار dL مماساً لسطح تساوي الجهد.



الشكل (1-8):- خطوط المجال الكهربائي وأسطح تساوي الجهد.

تدرج الجهد Voltage Gradient

إذا كان هناك سطحي تساوي جهد V و V + ΔV تفصل بينهما مسافة ΔL بوجود مجال كهربائي E عمودي عليهما كما يبين الشكل (1-9) فإن فرق الجهد يكون كما يلي:-

$$V_{12} = -\int_{1}^{2} \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L} \Rightarrow \Delta V \cong -E_L \ \Delta L$$

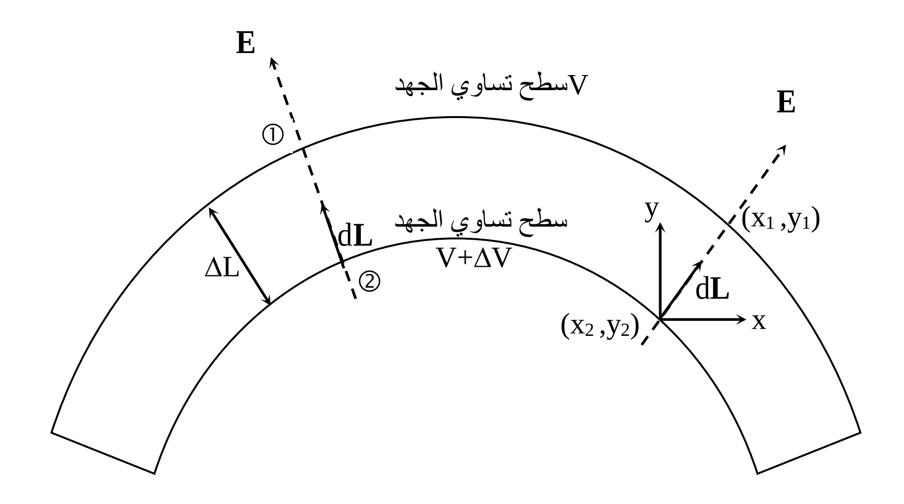
حيث إن EL هو المجال الكهربائي باتجاه ΔL، أو

$$E_L \approx -\Delta V / \Delta L \quad \textbf{(7 - 1)}$$

وتبين العلاقة الأخيرة أن المجال الكهربائي هو معدل تغير الجهد في الاتجاه العمودي على السطح الذي يمثل ذلك الجهد.

فإذا كان dL= dx ax فإن $E_x \approx -\dfrac{\Delta V}{\Delta x}$ **أو** $(\mathbf{E} = E_x\ \mathbf{a}_x \approx -\dfrac{\Delta V}{\Delta x}\mathbf{a}_x)$ **وإذا كانت dL= dy ay فإن** $E_y \approx -\dfrac{\Delta V}{\Delta y}$ **،أما إذا كان dL = dz az فإن** $E_z \approx -\dfrac{\Delta V}{\Delta z}$ **وبالتالي إذا كان dL = dx ax + dy ay + dz az فإن المجال الكهربائي E يكون كما يلي:-**

$$\mathbf{E} = E_x\ \mathbf{a}_x + E_y\ \mathbf{a}_y + E_z\ \mathbf{a}_z \approx -\left(\frac{\Delta V}{\Delta x}\mathbf{a}_x + \frac{\Delta V}{\Delta x}\mathbf{a}_y + \frac{\Delta V}{\Delta z}\mathbf{a}_z\right)$$



الشكل (1-9):-سطحا تساوي الجهد V و $V + \Delta V$ تفصل بينهما مسافة ΔL بوجود مجال كهربائي E .

وعندما تؤول $\Delta \mathbf{L} \to d\mathbf{L} \to 0$ فإن العلاقة الأخيرة تكتب كما يلي:-

$$\mathbf{E} = -\left(\frac{\partial V}{\partial x} \mathbf{a}_x + \frac{\partial V}{\partial y} \mathbf{a}_y + \frac{\partial V}{\partial z} \mathbf{a}_z \right)$$

$$= -\left(\frac{\partial}{\partial x} \mathbf{a}_x + \frac{\partial}{\partial y} \mathbf{a}_y + \frac{\partial}{\partial z} \mathbf{a}_z \right) V(x,y,z)$$

(8a -1)

أو (8b-1) $\mathbf{E} = -\nabla V$

حيث إن $\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{a}_x + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{a}_y + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{a}_z$ ويدعى بالتدرج (gradient)

أو بمعدل التغير، ويكون في الإحداثيات الأسطوانية كما يلي:-

$$\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial \rho}\mathbf{a}_\rho + \frac{1}{\rho}\frac{\partial}{\partial \phi}\mathbf{a}_\phi + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{a}_z$$

أما في الإحداثيات الكروية فيكون كما يلي:-

$$\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial r}\mathbf{a}_r + \frac{\partial}{r\,\partial \theta}\mathbf{a}_\theta + \frac{\partial}{r\sin\theta\,\partial \phi}\mathbf{a}_\phi$$

مثال (4-1):- إذا كان جهد مصدر معين معطى بما يلي $V(r, \theta,\phi) = 50 / r$ V:-

(i)أو $V(x,y,z) = 5 x2y$ V (ii).أوجد المجال الكهربائي لكل حالة.

الحـــل:-

(i) يتم استخدام العلاقة (8a-1) في الإحداثيات الكروية أو

$$\mathbf{E} = -\nabla V = \frac{50}{r^2}\,\mathbf{a}_r \qquad V/m$$

(ii)

يتم استخدام العلاقة (8 a-1) في الإحداثيات الكارتيزية أو

$$\mathbf{E} = -\nabla\ V = -10\ x\ y\ \mathbf{a}_x - 5\ x^2\ \mathbf{a}_y \quad V/m$$

كثافة الفيض الكهربائي D وقانون جاوس

تبين المعادلة (3-1) المجال الكهربائي الناتج عن شحنة نقطية وسيتم كتابتها هنا كما يلي:-

$$\mathbf{E} = \frac{1}{\varepsilon}\ \frac{q}{4\pi\ r^2}\ \mathbf{a}_r \qquad V/m$$

ويمكن النظر إليها على أساس أن المجال الكهربائي ينتج عن شحنة نقطية يتوزع أثرها بشكل منتظم على مساحة كرة نصف قطرهاr في وسط سماحيته ε. وسيتم تعريف الكمية $(q/4\pi\, r^2)\ \ C/m^2$ **على أنها كثافة الفيض الكهربائي (electric flux density)D، أو متجه الإزاحة displacement vector، أو**

(9a-1)

$$\mathbf{D} = \frac{q}{4\pi r^2}\,\mathbf{a}_r \qquad C/m^2$$

وبالتالي فإن:

$$\mathbf{D} = \varepsilon\,\mathbf{E} \qquad C/m^2 \qquad (9b-1)$$

ويلاحظ أن خصائص الوسط ε لمتظهر في المعادلة (9a-1). أما إذا كان المصدر موجودا على شكل شحنات حجمية ρ_v في حجم V' فيمكن كتابة Dكما يلي:-

$$\mathbf{D} = \iiint_{V'} \frac{\rho_v\, dV'}{4\pi R^2}\,\mathbf{a}_r \qquad C/m^2$$

(10-1)

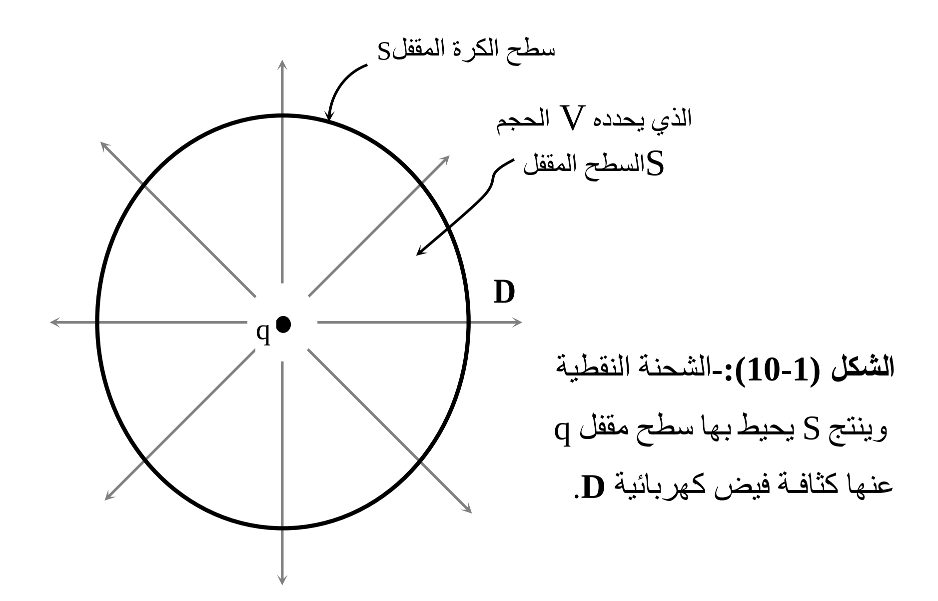
يمكن النظر إلى المعادلة(9a-1)على أن الشحنة النقطيةq تنتج آثاراً على شكل كثافة الفيض الكهربائيD تم بيانها على شكل خطوط تخترق سطح الكرة المقفل وذلك كما يبينه الشكل(10-1). وإذا ما تم حساب كل الفيض الكهربائي أو كل الآثار الناتجة عن الشحنة q، فإن الناتج سيكون هو الشحنة النقطية q (مصدر هذه الآثار). ويتم حساب الفيض الكهربائي من خلال تجميع كل الخطوط الممثلة لكثافة الفيض الكهربائي النابع من سطح الكرة المقفل كما يلي :-

$$\oint\!\!\oint_S \mathbf{D} \bullet d\mathbf{S} = \int_0^{\pi}\int_0^{2\pi} \frac{q}{4\pi r^2}\, \mathbf{a}_r \bullet r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi \; \mathbf{a}_r = q$$

أو يمكن كتابتها على الشكل التالي:-

$$\oint\!\!\oint_S \mathbf{D} \bullet d\mathbf{S} = q = \iiint_V \rho_v \, dV \qquad \textbf{(11-1)}$$

وتربط العلاقة (11-1) بين المصدر (الشحنة q) وبين ما ينتج عنه من كثافة فيض كهربائية D من خلال سطح مقفل S (والذي يمكن أن يكون له أي شكل) يحوي بداخلة حجماً V حيث إن المصدر يوجد بداخل هذا الحجم. ويكون المصدر على شكل شحنة (أو شحنات) نقطية أو على شكل شحنات حجمية أو على أي شكل آخر. وتعرف العلاقة(11-1) بقانون جاوس (Gauss Law) ويطلق على السطح المقفل(S(Closed Surface بسطح جاوس(Gauss Surface). ويربط هذا القانون المصدر بما ينتج عنه وسيتم استخدامه لإيجاد متجه الإزاحة D من هذه المعادلة التكاملية والتي لن يكون حلها ميسراً إلا في بعض الحالات الخاصة والتي تتسم بالتماثل الهندسي والكهربائي في طبيعتها.



الشكل (1-10):-الشحنة النقطية
وينتج S يحيط بها سطح مقفل q
عنها كثافة فيض كهربائية **D**.

مثال (1-5) :- يبين الشكل (1-11) سلك موصل طويل يحمل كثافة شحنات خطية $\rho_L \; C/m$، أوجد كثافة الفيض الكهربائي D وشدة المجال الكهربائي E الناتجين عنه.

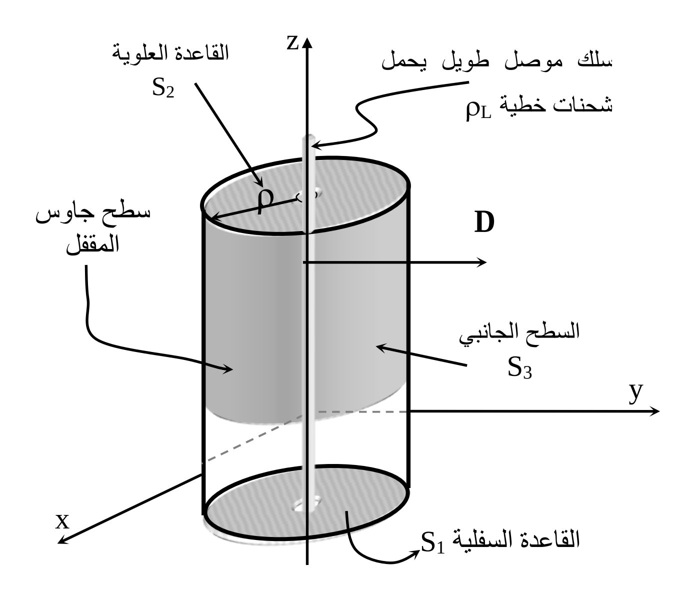
الحـــل :-

في ضوء التماثل فإن قانون جاوس سيستخدم لحل هذا المثال حيث يتم اختيار سطح جاوس المقفل ليلائم إحداثيات وهندسية المسألة والذي يكون هنا عبارة عن اسطوانة محورها هو السلك الموصل بطول L وذلك كما هو مبين في الشكل (1-11). وباستخدام الإحداثيات الأسطوانية وملاحظة انه ومن التماثل في هذا المثال فإن D لن يكون له عنص رإلا في اتجاه $\mathbf{a}_\rho$ وكذلك فإنه لن يتغير مع z أو ϕ أو أن

$$\mathbf{D} = D_\rho\ (\rho)\ \mathbf{a}_\rho \quad C/m^2$$

وبالتالي فإن قانون جاوس يصبح كما يلي:-

$$\oiint_S \mathbf{D} \bullet d\mathbf{S} = \left[\iint_{S_1} + \iint_{S_2} + \iint_{S_3} \right] (\mathbf{D} \bullet d\mathbf{S}) = \int_L \rho_L\ dz$$



الشكل (11-1):-سلك موصل طويل يحمل كثافة شحنات خطية $\rho_L \;\; C/m$ مبيناً عليه المقفل. سطح جاوس

في ضوء ما سبق يؤول التكاملان علىs1 و s2إلى الصفر ويتبقى التكامل علىs3 كما يلي:-

$$D_\rho \int_{\phi=0}^{2\pi}\int_{0}^{L} \rho d\phi\, dz = \rho_L\, L \;\Rightarrow\Rightarrow\; 2\,\pi\,\rho\, L\, D_\rho = \rho_L\, L \Rightarrow\Rightarrow D_\rho =$$

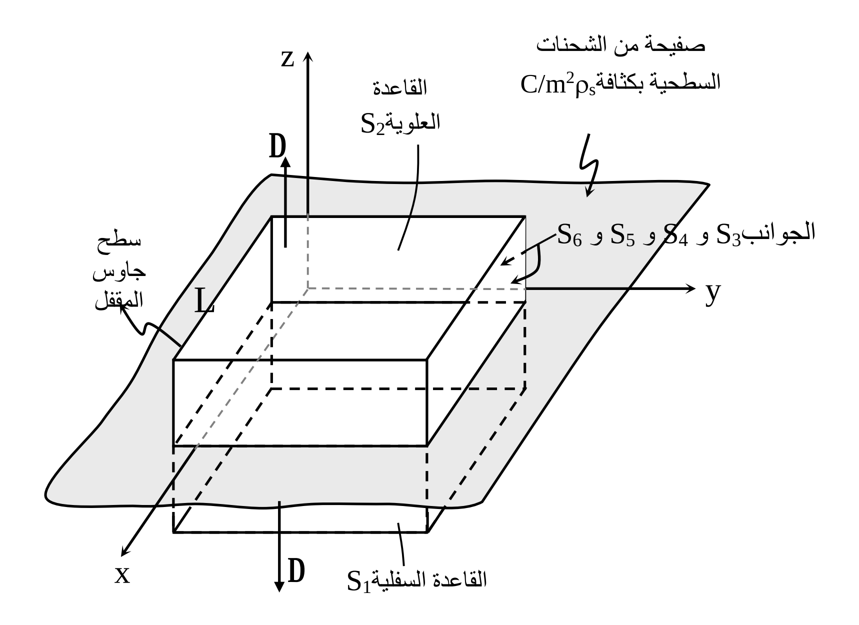
$$\frac{\rho_L}{2\pi\,\rho}\, C/m^2$$

ويكون المجال الكهربائي

$$E_\rho = D_\rho\,/\varepsilon_0 = \rho_L\,/(2\,\pi\,\varepsilon_0\,\rho) \qquad V/m$$

يلاحظ من هذا المثال سهولة الحصول على الناتج مقارنة بالمثال 1-2 .

مثال (1-6):- أوجد كثافة الفيض الكهربائي D وشدة المجال الكهربائي E الناتجين عن صفيحة من الشحنات السطحية بكثافة $\rho_s \;\; C/m^2$ ، الصفيحة لا نهائية في أبعادها وموضوعة في المستوى xy عند z = 0 كما هو مبين في الشكل (1-12).



الشكل (1-12):-صفيحة من الشحنات السطحية بكثافة ρ_s مبيناً عليها سطح جاوس المقفل.

الحـــل:-

في ضوء التماثل فإن كثافة الفيض الكهربائي D لا تتغير مع x أو مع yولا يكون لها إلا عنصر واحد في اتجاهz أو أن $\mathbf{D} = D_z\ \mathbf{a}_z$ ، فإذا تم اختيار سطح جاوس المقفـل على شكـل مكعب طول ضلعه L كما في الشكل (1-12) فإن قانون جاوس يعطي ما يلي:-

$$\oint\!\!\oint_S \mathbf{D} \bullet d\mathbf{S} = \left[\iint_{S_1} + \iint_{S_2} + \iint_{S_3+S_4+S_5+S_6}\right](\mathbf{D} \bullet d\mathbf{S}) = \iint_S \rho_s\ dS$$

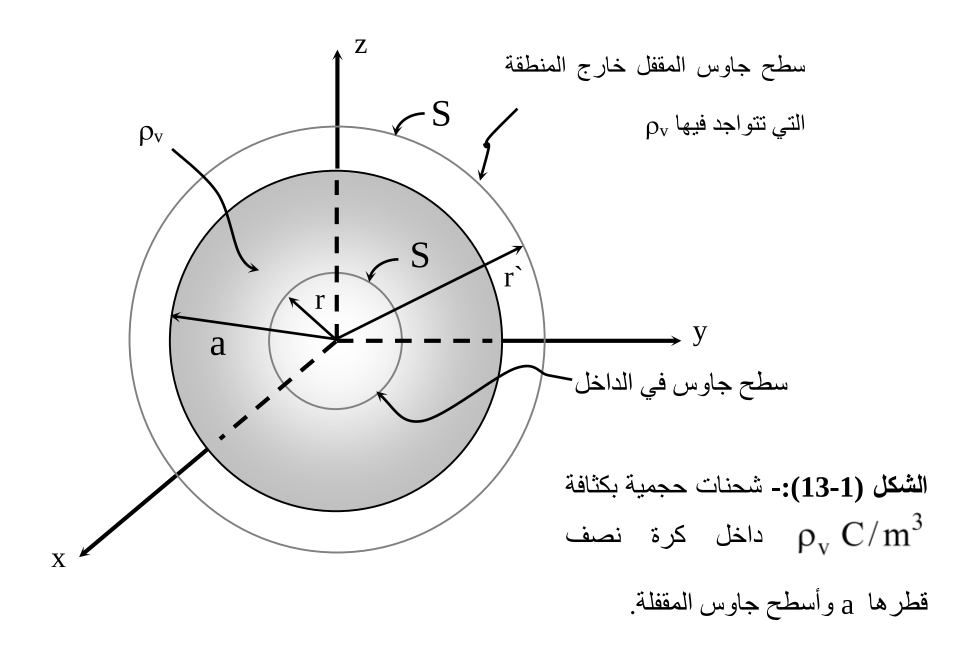
في ضوء ما سبق تكون نتيجة التكامل على الأسطحS3وS4و S5و S6 صفراً ويبقى ما يلي:-

$$D_z\ L^2 + D_z\ L^2 = \rho_s\ L^2 \Rightarrow\Rightarrow D_z = \rho_s / 2 \qquad C/m^2$$

أو إن أثر سطح الشحنات هذا ثابت لا يتغير. وتجدر الإشارة إلى أن كثافة الفيض الكهربائيD تتغير مع مربع مقلوب المسافة التي تفصل بين الشحنة النقطية ونقطة المراقبة ومع مقلوب المسافة التي تفصل خط الشحنات الطويل عن نقطة المراقبة، أما في هذه الحالة فإن كثافة الفيض الكهربائي تكون ثابتة. أما المجال الكهربائي فيكون

$$E_z = \rho_s / 2\varepsilon \qquad V/m$$

مثال (1-7):-يبين الشكل(1-13)حجماً على شكل كرة نصف قطرها a ويوجد داخلها توزيع من الشحنات الحجمية المنتظمة بكثافة $\rho_v \ C/m^3$. أوجد كثافة الفيض الكهربائي والمجال الكهربائي داخل وخارج الكرة وكذلك أوجد الجهد الكهربائي داخل وخارج الكرة، إذا كانت سماحية الوسط داخل وخارج الكرة هي ε.



الشكل (1-13):- شحنات حجمية بكثافة $\rho_v \ C/m^3$ داخل كرة نصف قطرها a وأسطح جاوس المقفلة.

الحـــل :-

في هذا المثال وفي ضوء التماثل فإن كثافة الفيض الكهربائي D لا تتغير مع θ أو ϕ ولا يكون لها إلا عنصراً واحداً في اتجاه r أو أن $\mathbf{D} = D_r(r) \ \mathbf{a}_r \quad C/m^2$ ، أو أن $\mathbf{D}$ في المنطقة $0 \le r \le a$ أو داخل الكرة تكون

$$\oiint_{S_1} \mathbf{D} \bullet d\mathbf{S} = D_r \int_{\phi=0}^{2\pi} \int_{\theta=0}^{\pi} r^2 \sin\theta \, d\theta \, d\phi = \rho_v \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\int_0^{r} r'^2 \sin\theta \, dr' \, d\theta \, d\phi$$

أو

$$4\pi r^2 D_r = \frac{4\pi}{3} r^3 \rho_v \quad \Rightarrow\Rightarrow \quad D_r = \frac{\rho_v \; r}{3} \qquad C/m^2$$

ويكون المجال الكهربائي

$$E_r = \frac{\rho_v \; r}{3\,\varepsilon} \;\; V/m$$

أما في المنطقة خارج الكرة أو $r > a$ فإن

$$\oiint_{S_2} \mathbf{D} \bullet d\mathbf{S} = D_r \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi} r^2 \sin\theta \, d\,\theta \, d\,\phi = \rho_v \int_0^{2\pi}\int_0^{\pi}\int_0^{a} r^2 \sin\theta \, d\,\theta \, d\,\phi$$

أو

$$4\,\pi\, r^2 \, D_r = \frac{4\pi}{3} a^3 \rho_v \quad \Rightarrow\Rightarrow \quad D_r = \frac{a^3 \, \rho_v}{3\, r^2} \qquad C/m^2$$

ويكون المجال الكهربائي خارج الكرة

$$E_r = \frac{a^3 \rho_v}{3 r^2 \varepsilon} \qquad V/m \qquad \mathbf{(r > a)}$$

لإيجاد الجهد الكهربائي، يجب أن يكون جهد نقطة البداية معروفاً وفي هذه الحالة فهي النقطة $r \to \infty$ حيث يكون جهدها مساوياً للصفر. في المنطقة $\infty > r > a$ يكون الجهد كما يلي:-

$$V = -\int_{\infty}^{r} \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L} = -\int_{\infty}^{\mathbf{r}} \frac{a^3 \rho_v}{3 \varepsilon r'^2} \mathbf{a}_r \bullet dr' \, \mathbf{a}_r = \frac{a^3 \rho_v}{3 \varepsilon r} \qquad V$$

وفي المنطقة :- $0 \le r \le a$

$$V = -\int_{\infty}^{r} \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L} = \left[\int_{\infty}^{a} + \int_{a}^{r} \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L} \right]$$

$$= \frac{a^2 \rho_v}{3 \varepsilon} - \int_{a}^{r} \frac{\rho_v \, r'}{3 \varepsilon} \mathbf{a}_r \bullet dr' \, \mathbf{a}_r = \frac{a^2 \rho_v}{3 \varepsilon} + \frac{\rho_v}{6 \varepsilon} (a^2 - r^2) \qquad V$$

تشتت كثافة الفيض الكهربائي $(\nabla \bullet \mathbf{D})$

بالرجوع إلى قانون جاوس المبين في العلاقة (1-11) والذي إذا تم تطبيقه على سطح صغير مقفل ΔS يحوي حجماً صغيراً ΔV فإنه يمكن كتابته كما يلي:-

$$\oint\!\!\oint_{\Delta S} \mathbf{D} \bullet d\mathbf{S} = \iiint_{\Delta V} \rho_v \, dV \approx \rho_v \, \Delta V$$

وتصبح العلاقة الأخيرة صحيحة تماماً إذا ما آلت ΔS إلى الصفر وعندها فإن ΔV ستؤول إلى الصفر ويتم الحصول على ما يلي :-

$$\rho_v = \lim_{\Delta S \to 0} \frac{\oint\!\!\oint_{\Delta S} \mathbf{D} \bullet d\mathbf{S}}{\Delta V}$$

ويمكن أن يتم تطبيق ذلك على متوازي مستطيلات أطوال أضلاعه Δx و Δy و Δz وإذا آلت هذه الأطوال إلى الصفر فإن هذا يؤدي إلى

$$\rho_v = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} \equiv \nabla \bullet \mathbf{D}$$

أو

$$\nabla \bullet \mathbf{D} = \rho_v \quad \textbf{(12-1)}$$

حيث إن $\nabla \equiv \frac{\partial}{\partial x}\mathbf{a}_x + \frac{\partial}{\partial y}\mathbf{a}_y + \frac{\partial}{\partial z}\mathbf{a}_z$ **، و تحدد العلاقة (1-12) أن**

التشتت في D(Divergence of D) هو كثافة الشحنات الحجمية. ويبين الملحق-6)

(III التشتت في Dللإحداثيات الأسطوانية والكروية.

مثال (1- 8) :- إذا كانت كثافة الفيض الكهربائي في وسط ما

$$\mathbf{D} = x\,\mathbf{a}_x + y\,\mathbf{a}_y + z\,\mathbf{a}_z \quad \mathrm{n\,C/m^2}$$

أوجد الشحنات الحجمية في هذا الوسط وكمية الشحنات الكلية في مكعب طول ضلعه 2 m.

الحـــل:-

يتم إيجاد كثافة الشحنات الحجمية من المعادلة (1-12) كما يلي :-

$$\rho_v = \nabla \bullet \mathbf{D} = \frac{\partial D_x}{\partial x} + \frac{\partial D_y}{\partial y} + \frac{\partial D_z}{\partial z} = 1+1+1 = 3 \quad \mathrm{nC/m^2}$$

أما الشحنات الكلية في المكعب المذكور فتكون كما يلي :-

$$Q = \int_0^2 \int_0^2 \int_0^2 3\, dx\, dy\, dz = 24 \quad nC$$

مثال (1 -9) :- في المثال (1-7) أوجد $\nabla \bullet \mathbf{D}$ في المنطقة $\infty > r > a$.

الحــــل :-

من المثال (1 - 7) وفي المنطقة $\infty > r > a$ تكون كثافة الفيض الكهربائي D كما يلي -

:

$$D_r = \frac{a^3 \ \rho_v}{3 \ r^2} \qquad C/m^2$$

من الملحق (III-6)يتم إيجاد $\nabla \bullet \mathbf{D}$ في الإحداثيات الكروية $(\mathbf{D} = D_r \ \mathbf{a}_r)$ كما

يلي:-

$$\rho_v = \nabla \bullet \mathbf{D} = \frac{1}{r^2} \frac{\partial}{\partial r} (r^2\, D_r) + 0 + 0 \;=\; 0 \quad C/m^3$$

وهذا يتفق مع الحقيقة أنه ليس هناك شحنات في المنطقة. $a < r < \infty$

معادلات لابلاس وبوسان Poisson's & Laplace's equations

يمكن أن يتم ربط الجهد الكهربائي $V(\mathbf{r})$ **مع الشحنات الحجمية** $\rho_v(\mathbf{r})$ **من خلال استخدام تشتتكثافة الفيض الكهربائي** $\mathbf{D}(\mathbf{r})$ **وتدرج الجهد الكهربائي** $V(\mathbf{r})$ **أو**

$\nabla \bullet \mathbf{D} = \rho_v$ **و** $\mathbf{E} = -\nabla V = \mathbf{D}/\varepsilon$ **أو أن**

$$-\nabla \bullet (\nabla V) \;=\; \nabla \bullet \left(\frac{\mathbf{D}}{\varepsilon}\right)$$

وإذا كان الوسط متجانساً وأحادي الاتجاه أو أن السماحية هي كمية قياسية وليست دالة في $\mathbf{r}$ **أو** $\varepsilon \neq \varepsilon(\mathbf{r})$ **، فإن** $\nabla \bullet \left(\frac{\mathbf{D}}{\varepsilon}\right) = \frac{1}{\varepsilon}\; \nabla \bullet \mathbf{D}$ **أو أن**

$$\nabla^2 V(\mathbf{r}) = -\rho_v / \varepsilon \qquad \textbf{(13-1)}$$

حيث إن $\nabla^2 \equiv \frac{\partial^2}{\partial x^2} + \frac{\partial^2}{\partial y^2} + \frac{\partial^2}{\partial z^2}$ في الإحداثيات الكارتيزية ويطلق عليها أسم لابلاسيان (**Laplacian**) ويمكن إيجاد قيمتها في الإحداثيات الأخرى من الملحق (**6-III**).

تدعى العلاقة(1-13)بمعادلة بوسان والتي تربط الجهد الكهربائي بكثافة الشحنات الحجمية في وسط معين وهي معادلة تفاضلية جزئية من الدرجة الثانية وغير متجانسة. وفي غياب الشحنات الحجمية فإن معادلة بوسان تصبح كما يلي:-

$$\nabla^2 V = 0 \qquad (14\text{-}1)$$

وهذه هي معادلة لابلاس وهي معادلة تفاضلية جزئية متجانسة من الدرجة الثانية وسيتم فيما يلي تقديم مثال لتوضيح حل هذه المعادلة.

مثال(1-10):- يبين الشكل (1-14) كابل محوري يتكون من موصل داخلي نصف قطره a وموصل خارجي نصف قطره b ويفصل بينهما وسط من الهواء خالٍ من الشحنات،فإذا كان جهد الموصل الداخلي V_0 وجهد الموصل الخارجي 0V وكان هذا الكابل يمتد إلى ما لانهاية فأوجد الجهد الكهربائي $V(\rho,\phi,z)$ بين الموصلين.

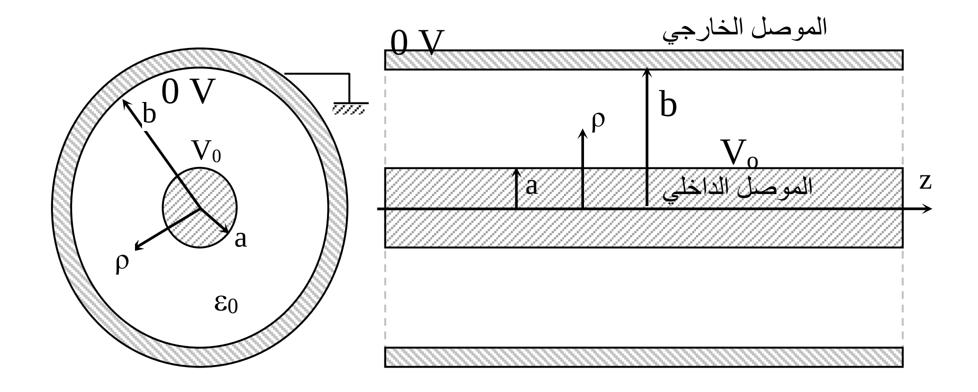
الحـــل:-

بما أن الشكل الهندسي هو أسطواني فسيكون من الأنسب والأسهل حل معادلة لابلاس في الإحداثيات الأسطوانية. ونظراً للتماثل في الجهد الكهربائي في ϕو zفإن $V(\rho,\phi,z)$ لا يتغير مع ϕأوz وإنما يعتمد على ρ أو أن معادلة لابلاس تصبح كما يلي :-

$$\nabla^2 V(\rho,\phi,z) = 0 = \frac{\partial^2 V}{\partial \rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{\partial V}{\partial \rho} + 0 + 0$$

أو

$$\frac{d^2 V}{d \rho^2} + \frac{1}{\rho}\frac{d V}{d \rho} = \frac{1}{\rho}\frac{d}{d \rho}\left(\rho \frac{d V}{d \rho}\right) = 0$$



الشكل (1-14):-كابل محوري موصله الداخلي موصول بمصدر فولطيته V_o V **والخارجي مؤرض.**

يكون حل المعادلة الأخيرة كما يلي $V(r) = A \ Ln\ (\rho) + B$ **:- وبما أن**

$V(a) = V_0$ **و** $V(b) = 0$ **فإن** $V_0 = A \ Ln\ (a) + B$ **وكذلك**

$$0 = A\, Ln\ (b) + B$$

أو أن $A = -V_0 / Ln\ (b/a)$ **و** $B = \dfrac{V_0 \ Ln\ (b)}{Ln\ (b/a)}$

وبالتالي فإن الجهد في الوسط بين الموصلين يصبح

$$V(r) = \frac{V_0 \, Ln\,(b/\rho)}{Ln\,(b/a)} \quad V$$

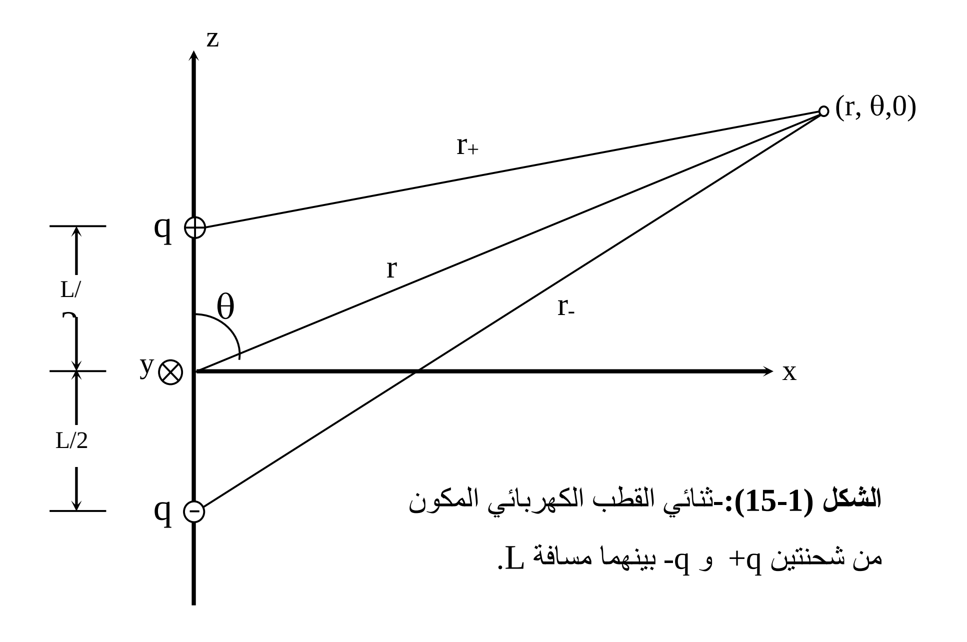
ثنائي القطب الكهربائي Electric Dipole

قبل الانتقال لبحث خصائص المواد العازلة سيتم إيجاد الجهد الكهربائي والمجال الكهربائي لثنائي القطب الكهربائي نظراً لأهميته وخاصة في دراسة هذه المواد. يتكون ثنائي القطب من شحنتين متساويتين إحداهما موجبة والأخرى سالبة يفصل بينهما مسافة L وسيتم إيجاد الجهد والمجال الكهربائي بعيداً عن هذا الثنائي، عند النقطة r حيث إن $L \ll r$ وذلك كما هو مبين في الشكل (1-15) . يلاحظ أن هناك تماثلاً هندسياً وكهربائياً في المتغير ϕ وبالتالي فإن كلا من الجهد والمجال الكهربائي لا يتغيران مع تغير ϕ وعليه فسيتم أولاً إيجاد الجهد الكهربائي عند النقطة $(r, \theta, 0)$ كما يلي :-

$$V(r,\theta) = \frac{q}{4\,\pi\varepsilon}\left(\frac{1}{r_+} - \frac{1}{r_-}\right) \qquad V$$

حيث إن

$$r_{\pm} = \sqrt{r^2 + (L/2)^2\ \mu\, rL\cos\theta} = r\left(1 + (L/2r)^2\ \mu\,(L/r)\cos\theta\right)^{\frac{1}{2}}$$



الشكل (1-15):-ثنائي القطب الكهربائي المكون من شحنتين q+ و q- بينهما مسافة L.

وبما أن$L << r$ فيمكن إعادة كتابة $r_{\pm}$ باستخدام سلسلة تيلور(Taylor Series) أو

$$r_{\pm} = r\left[1 \mu (L/2r)\cos\theta + ...\right] \approx r \mu (L/2)\cos\theta$$

$$V(r,\theta) \approx \frac{q}{4\pi\varepsilon} \; \frac{L\cos\theta}{r^2 - (L/2)^2\cos^2\theta}$$

أو

$$V(r,\theta) = \frac{qL}{4\pi\varepsilon r^2}\cos\theta \qquad V$$

(15-1)

يتم إيجاد المجال الكهربائي$\mathbf{E}$ باستخدام تدرج الجهد $\mathbf{E} = -\nabla V$ أو أن

$$\mathbf{E} = E_r\mathbf{a}_r + E_\theta\mathbf{a}_\theta = \frac{qL}{4\pi\varepsilon r^3}\left[2\cos\theta\,\mathbf{a}_r + \sin\theta\,\mathbf{a}_\theta\right]$$

(16-1)

وتعرف الكمية qLعلى أنها العزم الكهربائي لثنائي القطب واتجاهها باتجاه az+ أو

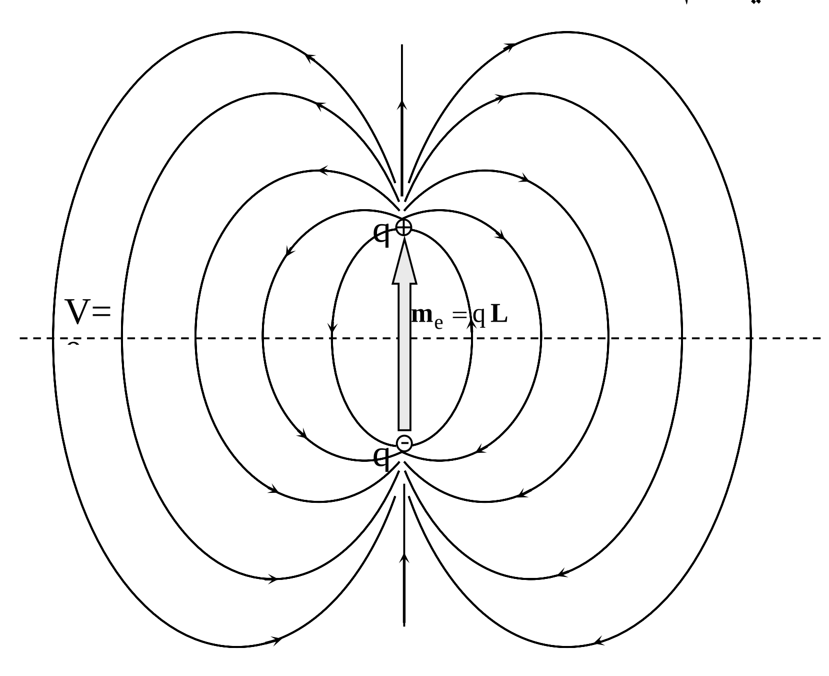
$$\mathbf{m}_e = q\mathbf{L} = qL\,\mathbf{a}_z \qquad Cm \qquad \textbf{(17-1)}$$

حيث إن اتجاه عزم ثنائي القطب (Electric Dipole Moment) يؤخذ بالمتجه النابع من الإشارة السالبة ومتجها إلى الإشارة الموجبة وفي ضوء ذلك يمكن إعادة كتابة المعادلتين(1-15)و(1-16)كما يلي :-

$$V(r,\theta) = \frac{\mathbf{m}_e \bullet \mathbf{a}_r}{4\,\pi\,\varepsilon\,r^2} \quad V$$ **(18 a-1)**

$$\mathbf{E} = \frac{|\mathbf{m}_e|}{4\,\pi\,\varepsilon\,r^3}\left(2\cos\theta\,\mathbf{a}_r + \sin\theta\,\mathbf{a}_\theta\right) \qquad V/m$$ **(18 b-1)**

ويبين الشكل (1-16) المجالات الكهربائية الناتجة عن هذا الثنائي الذي استبدل بمتجه ذي العزم me .



الشكل (1-16):-خطوط المجال الكهربائي الناتجة عن ثنائي قطب كهربائي بعزم $\mathbf{m}_e = q\mathbf{L}\ Cm$.

المواد العازلة Dielectric Materials

كما سبق ذكره فإن المواد تتكون من ذرات وتتكون الذرة من نواة تحتوي على شحنات موجبة(بروتونات) وأجسام أخرى غير مشحونة وحول هذه النواة هناك شحنات سالبة (الكترونات) تدور في مدارات حول النواة. يمكن النظر إلى هذه الذرة (أو مجموعة من تلك الذرات) المكونة من مجموعتين متساويتين من الشحنات (موجبة وسالبة) على أنها، ومن منظور خارجي، ثنائي قطب كهربائي وعزمه هو $\mathbf{m}_e = q\mathbf{L}\ \ Cm$ **، حيث إن L يتناسب مع نصف قطر الذرة (أو نصف قطر الفراغ الذي تشغله مجموعة من الذرات). إذا كان هناك عدد من هذه الثنائيات يساوي N في حجم مقداره** $\Delta V\ m^3$ **فإن كثافة هذه الثنائيات هي كما يلي :-**

$$\frac{\mathbf{m}_e\ N}{\Delta V} \equiv \mathbf{P} \qquad\qquad C/m^2$$

(19-1)

حيث إن P هو متجه الاستقطاب (polarization vector) ويمثل كثافة ثنائيات القطب لمادة معينة ووحداته تناظر الوحدات الخاصة بكثافة الفيض الكهربائي Dأو كثافة الشحنات السطحية، وبالتالي إذا كان هناك مادة عازلة بحجم V وكان بها عدد من ثنائيات القطب (مقداره N) فإنه إذا تأثرت بمجال كهربائي خارجي فإن هذه الثنائيات تصطف باتجاه المجال الكهربائي المؤثر وتضيف مجالاً كهربائياً إضافة إلى المجال الكهربائي الخارجي، أو بمنظور آخر، إذا ما تم أخذ الشكل (1-17) والذي يبين لوحين موصلين تفصل بينهما مسافة d وتم وصلهما ببطارية فولطيتها V_0 V، فإذا كان الوسط بين اللوحين هو الفراغ(vacuum) فإن المجال الكهربائي، الشكل (17a-1)، بين اللوحين يكون كما يلي:-

$$\mathbf{E} = \frac{V_0}{d}\,\mathbf{a}_x \qquad V/m \tag{20a-1}$$

وذلك بإهمال انحرافات (شراريب fringing) المجال الكهربائي بين اللوحين، وتكون كثافة الفيض الكهربائي في هذه الحالة

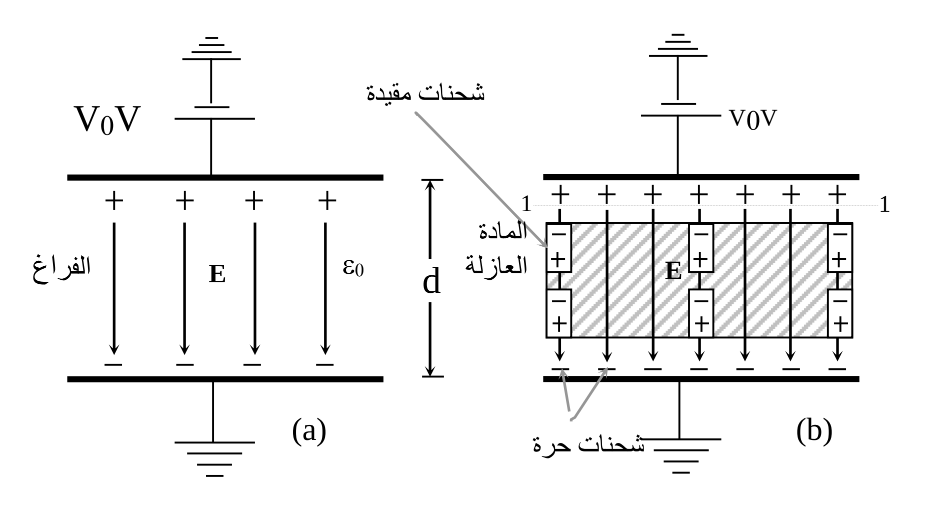
$$\mathbf{D}_0 = \varepsilon_0 \frac{V_0}{d}\,\mathbf{a}_x = \varepsilon_0\,\mathbf{E} \qquad V/m \tag{20b-1}$$

أما إذا كان الوسط بين اللوحين هو مادة عازلة فإن المجال الكهربائي يعمل على اصطفاف ثنائيات القطب الكهربائية لهذه المادة كما هو مبين في الشكل (1-17b).
ويخلق هذا الاصطفاف شحنات مقيدة (bounded charges)، أو متجه الاستقطاب، حيث يمكن للمراقب ملاحظتها من أحد أطراف المادة (فمثلاً إذا وقف عند المستوى1-1 ونظر إلى الأسفل فإنه يرى شحنات سالبة). وتدعى بالشحنات المقيدة لأنها تظهر كزوج(أو ثنائي) من الشحنات موجبة وسالبة ويصعب فصلها عن بعضها.
وتجتذب هذه الثنائيات أو الشحنات المقيدة شحنات حرة إضافية من المصدر.
وبالتالي فإن الشحنات التي تتواجد على اللوح العلوي(أو السفلي) تزداد في هذه الحالة مقارنة بالحالة السابقة. وتكون كثافة الفيض الكهربائي لهذه الحالة مساوية لكثافة الفيض الكهربائي السابقة إضافة لكمية أخرى تنتج عن استقطاب المادة العازلة على شكل متجه الاستقطاب P أو أن $D = D_0 + P$ **أو**

$$\varepsilon\ E\ = \varepsilon\ V_0 / d \ \mathbf{(21\text{-}1)} = D = \varepsilon_0\ E + P$$

وتمثل ε سماحية المادة العازلة أو قدرة المادة على الاستقطاب أو كثافة ثنائيات القطب للمادة وتعطى قيمتها بما يلي :-

$$\varepsilon = D/E = \varepsilon_0 + P/E \quad \mathbf{(22\text{-}1)}$$



الشكل (1-17):-لوحان موصلان موصولان ببطارية فولطيتها V0(a) عندما يكون الفراغ فاصلاً بينهما (b) عندما تستخدم مادة عازلة لتفصل بينهما.

ويمكن إعادة كتابة المعادلة (1-22) كما يلي :-

$$\varepsilon = \varepsilon_r \ \varepsilon_0 = \varepsilon_0 \left(1 + P/D\right) \quad \textbf{(23-1)}$$

وتمثل ε_r قيمة السماحية النسبية للمادة ويبين الجدول (1-1) قيمة ε_r لمواد مختلفة. ومن المعادلات السابقة فإن متجه الاستقطاب P يعطى بما يلي:-

$$\mathbf{P} = (\varepsilon - \varepsilon_0)\,\mathbf{E} = (\varepsilon_r - 1)\,\varepsilon_0\,\mathbf{E} = (\varepsilon_r - 1)\ \mathbf{D} \quad \textbf{(24-1)}$$

وتجدر الإشارة إلى أن المتجه D مرتبط مع كثافة الشحنات الحرة، أما المتجهP فهو مرتبط مع كثافة الشحنات المقيدة (ثنائيات القطب)، وسيتم ربط هذه الكميات ببعضها عند معالجة شروط الحدود.

الجدول (1-1):-قيمة ε_r لعدد من المواد المختلفة.

اسم المادة	قيمة ε_r
الفراغ	**1**
الهواء (ضغط جوي واحد)	**1.0006**
الخشب الجاف	**2.1**
المطاط	**3**
الكوارتز	**4**
الزجاج	**6**
الماء المقطر	**81**

شروط الحدود Boundary Conditions

إذا كان هناك وسطان وخصائصهما:

كما هو مبين على الشكل (1-18) وكان المجال الكهربائي وكثافة الفيض الكهربائي في الوسط العلويE_1و D_1 وفي ا لوسط السفليE_2 وD_2 ، فإن السؤال الذي يمكن طرحه هو كيف ترتبط هذه الكميات مع بعضها عند السطح الفاصل بين الوسطين؟ وللإجابة على هذا السؤال يتم تصنيف المجالات الكهربائية إلى نوعين:الأول مماس للسطح الفاصل بين الوسطين E_{1t}و E_{2t}و D_{t1}و D_{2t}

والنوع الثاني عمودي على هذا السطحE_{1n} و E_{2n} و D_{1n}و D_{2n}، وسيتم فيما يلي معالجة كل صنف من هذه المجالات الكهربائية.

كثافة الفيض الكهربائي العمودي:- n يتم في هذه الحالة اعتماد أسطوانة صغيرة (سطح جاوس المقفل) بارتفاع Δh **ومساحة كل من القاعدتين** $\Delta S_{1,2}$ **كما يبين الشكل (1-18)، وتؤخذ لتكون عمودية على السطح الفاصل بين الوسطين. يطبق قانون جاوس كما يلي:-**

$$\oiint_S \mathbf{D} \bullet \mathbf{dS} = \left[\iint_{\Delta S_1} + \iint_{\Delta S_2} + \iint_{\Delta S_3} \right] \mathbf{D} \bullet \mathbf{dS}$$

$$= \iiint_V \rho_v \, dV = \iint_{\Delta S} \mathbf{dS} \int_{\Delta h} \rho_v \, dh \qquad \textbf{(25-1)}$$

وللتركيز على المجالات العمودية على السطح الفاصل بين الوسطين يتم جعل Δh تؤول إلى الصفر وبالتالي فإن التكامل على ΔS_3 (السطح الجانبي للاسطوانة) يؤول إلى الصفر وكذلك فإن التكامل الداخلي $\int_{\Delta h} \rho_v \, dh$ يؤول إلى الصفر إلا إذا كان هناك كثافة شحنات سطحية وفي هذه الحالة فإن:

$$\lim_{\Delta h \to 0} \int_{\Delta h} \rho_v \, dh = \rho_s \quad C/m^2$$

وبالتالي فإن المعادلة (1-25) تصبح كما يلي:-

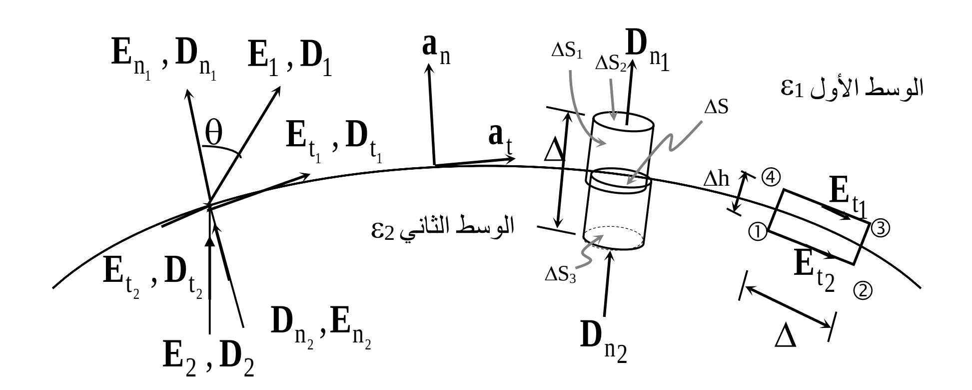
$$D_{n1} \; \Delta S_1 - D_{n2} \; DS_2 \; \cong \; \rho_s \; \Delta S$$

وتتحول علاقة التساوي بالتقريب إلى تساوي عندما تؤول كلُ من ΔS_1 و ΔS_2 إلى الصفر (وبالتالي تؤول ΔS إلى الصفر)، وعندها فإن العلاقة الأخيرة تصبح كما يلي :-

$$D_{n1} - D_{n2} = \rho_s \quad C/m^2 \qquad \textbf{(26a-1)}$$

أي أن عدم الاستمرارية في قيم كثافة الفيض الكهربائي العمودي Dn يعزى إلى وجود كثافة شحنات سطحية عند السطح الفاصل بين الوسطين وينتج عن غياب هذه الشحنات السطحية استمرارية في قيم كثافة الفيض الكهربائي العمودي أو

$$D_{n1} = D_{n2} \quad \textbf{(26b-1)}$$



الشكل (1-18):-المجالات الكهربائية E و D في الوسطين الأول وسماحيته ε_1 والثاني وسماحيته ε_2.

أو أن المجالات الكهربائية العمودية على السطح ترتبط مع بعضها كما يلي:-

$$\varepsilon_1 \ E_{n1} - \varepsilon_2 \ E_{n2} = \rho_s \qquad C/m^2 \qquad \textbf{(27a-1)}$$

بوجود كثافة الشحنات السطحية،

$$\varepsilon_1 \ E_{n1} = \varepsilon_2 \ E_{n2} \qquad \textbf{(27b-1)}$$

في غياب كثافة الشحنات السطحية.

المجالات الكهربائية الماسة للسطح Et :- يتـم اعتمـاد المستطيـل 1-2-3-4-1 كما يبين الشكل (1-18)، مع ملاحظة أن $\int_1^2 \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L} = -\int_2^1 \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L}$ ، وتصبح مساهمة تكامل $\mathbf{E} \bullet d\mathbf{L}$ حول هذا المسار المقفل مساوية للصفر أو

$$\oint \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L} = \left[\int_1^2 + \int_2^3 + \int_3^4 + \int_4^1 \right] \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L} = 0$$

وللتركيز على المجالات الكهربائية الماسة للسطح Et يتم جعل Δh تؤول إلى الصفر وفي هذه الحالة يؤول التكاملين $\int_2^3$ و $\int_4^1$ إلى الصفر ويتبقى من العلاقة الأخيرة ما يلي:-

$$E_{t2}\ \Delta L - E_{t1}\ \Delta L \approx 0$$

وعندما تؤول ΔL إلى الصفر يتم الحصول على العلاقة التالية:-

$$E_{t1} = E_{t2} \quad \textbf{(28-1)}$$

أو أن المجالات الكهربائية الماسة للسطح الفاصل بين الوسطين تكون مستمرة عند الانتقال من الوسط السفلي إلى الوسط العلوي (في حدود سمك صغيرة يؤول إلى الصفر). أما كثافات الفيض الكهربائي الماسة للسطح فترتبط مع بعضها كما يلي:-

$$D_{t1}/\varepsilon_1 = D_{t2}/\varepsilon_2 \quad \textbf{(29-1)}$$

وفي ضوء المعادلتين (27b-1) و(28-1) يلاحظ أن $\theta_1 \neq \theta_2$ وبالتالي فإن خطوط المجال الكهربائي تبدو وكأنها مكسورة عند الانتقال من وسط لآخر.

تم في المعادلة (26a-1) ربط كثافة الفيض الكهربائي بكثافة الشحنات السطحية الحرة ρ_s والتي تكون في العادة متوفرة للأوساط الموصلة. أما في الأوساط العازلة حيث تتواجد الشحنات المقيدة فيمكن ربطها مع متجه الاستقطاب. فإذا كان هناك وسطين عازلين متلامسين فإن كثافة الشحنات السطحية المقيدة ρ_{sb} تصبح كما يلي

-:

$$P_{n1} - P_{n2} = -\rho_{sb}$$ **(30a-1)**

حيث إن P_{n1} و P_{n2} هما متجها الاستقطاب للوسط الأول والثاني على التوالي، وإذا كان الوسط الثاني فراغاً $(P_{n2} = 0)$ فإن:-

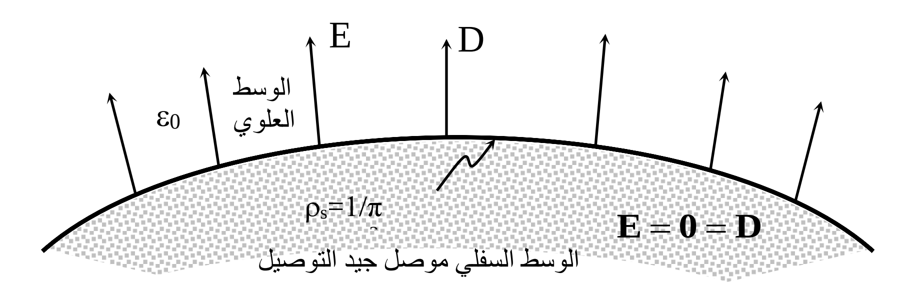
$$P_{n1} = -\rho_{sb}$$ **(30b-1)**

مثال (11-1):- إذا كان الوسط العلوي في الشكل (18-1) هو الهواء $\varepsilon_0 \;\; F/m$ **والوسط السفلي هو مادة موصلة جيدة التوصيل، أوجد المجالات الكهربائية في الوسطين إذا كانت كثافة الشحنات السطحية على السطح الفاصل بين الوسطين** $(1/\pi) \;\; nC/m^2$.

الحـــل:-

من المعلوم أن الأوساط الموصلة متساوية الجهد وبالتالي فإن المجالات الكهربائية بداخلها تساوي صفراً أو أن $\mathbf{D} = 0$ و $\mathbf{E} = 0$ داخل الوسط السفلي. في ضوء ذلك فإن $E_{t2} = 0 = E_{t1}$ و $D_{t2} = 0 = D_{t1}$ وكذلك فإن $D_{n1} - D_{n2} = \rho_s$ وحيث إن $D_{n2} = 0$ فإن المجال الكهربائي في الوسط العلوي هو $D_{n1} = \frac{1}{\pi}\ nC/m^2$ و $E_{n1} = D_{n1}/\varepsilon_0 = 36\ \ V/m$.

ويبين الشكل (19-1) المجالات الكهربائية لهذا المثال في كلا الوسطين.



الشكل (19-1):- المجالات الكهربائية داخل وخارج وسط موصل جيد التوصيل.

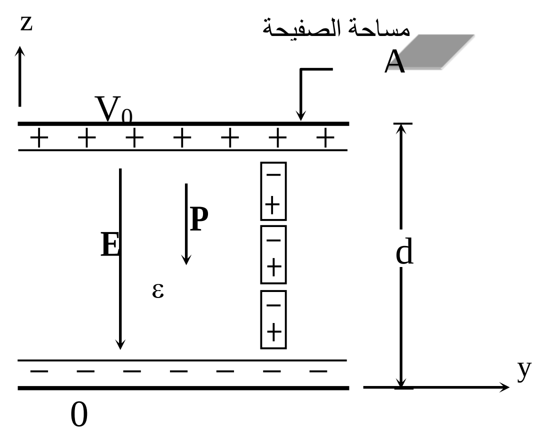
المواسع والطاقة الكهربائية Capacitor and Electric Energy

المواسع أو المكثف (capacitor) هو النبيطة التي تقوم بخزن الطاقة الكهربائية أو أنه ومن خلاله يتم ربط الدارات الكهربائية مع بعضها كهربائياً (عبر خطوط المجال الكهربائي أو عبر ما يسمى في بعض الأحيان بالمواسعات الشاردة stray (capacitors). ويتكون المواسع من موصلين على أحدهما شحنة موجبة q+ وعلى الآخر شحنة سالبة q- وبينهما فرق جهد V وتعّرف سعة المواسع C بما يلي :-

$$C \equiv \frac{q}{V} = \frac{\iint_S \rho_S \, dS}{-\int_L \mathbf{E} \bullet \mathbf{dL}} \qquad (30\text{-}1)$$

وتعطى وحداته بالفاراد (Farad, F).

مثال (1-12):- يبين الشكل (1-20) مواسعاً ذا صفيحتين متوازيتين (parallel plate) فإذا كانت مساحة كل صفيحة A m2 والمسافة بينهما d وكان جهد الصفيحة السفلية 0 V والعلوية V_0 V وسماحية الوسط العازل بين الصفيحتين $\varepsilon_r \, \varepsilon_0$ F/m . أوجد كثافة الشحنات السطحية الحرة على كل من الوجه السفلي والعلوي للصفيحتين العلوية والسفلية وذلك على التوالي. أوجد كذلك كثافة الشحنات السطحية المقيـدة على الوجه العلوي والسفلي للمادة العازلة. أوجد كذلك سعة هذا المواسع. أهمل الانحناءات (الشراريب) في خطوط المجال الكهربائي.



الشكل (1-20):-المواسع ذو الصفيحتين المتوازيتين.

الحـــل:-

يكون المجال الكهربائي بين اللوحين كما يلي $E_z = -V_0/d \quad V/m$

وكثافة الفيض الكهربائي $D_z = -V_0 \ \varepsilon_r \ \varepsilon_0/d \quad C/m^2$

أما متجه الاستقطاب فيكون كما يلي $\mathbf{P} = (\varepsilon_r - 1) \ \varepsilon_0 \ \mathbf{E}$

أو $P_z = (\varepsilon_r - 1) \ \varepsilon_0 \ V/d \quad C/m^2$

وبالتالي فإن كثافة الشحنات السطحية الحرة تكون كما يلي:-

$$\rho_s = V_0 \ \varepsilon_r \ \varepsilon_0/d \quad C/m^2$$

للسطح السفلي للصفيحة العلوية، و

$$\rho_s = -V_0\ \varepsilon_r\ \varepsilon_0 / d \quad C/m^2$$

للسطح العلوي للصفيحة السفلية. أما كثافة الشحنات السطحية المقيدة فهي كما يلي:-

$$\rho_{sb} = -\ (\varepsilon_r - 1)\ \varepsilon_0 V_0 / d \quad C/m^2$$

للوجه العلوي للمادة العازلة، و

$$\rho_{sb} = (\varepsilon_r - 1)\ \varepsilon_0 V_0 / d \quad C/m^2$$

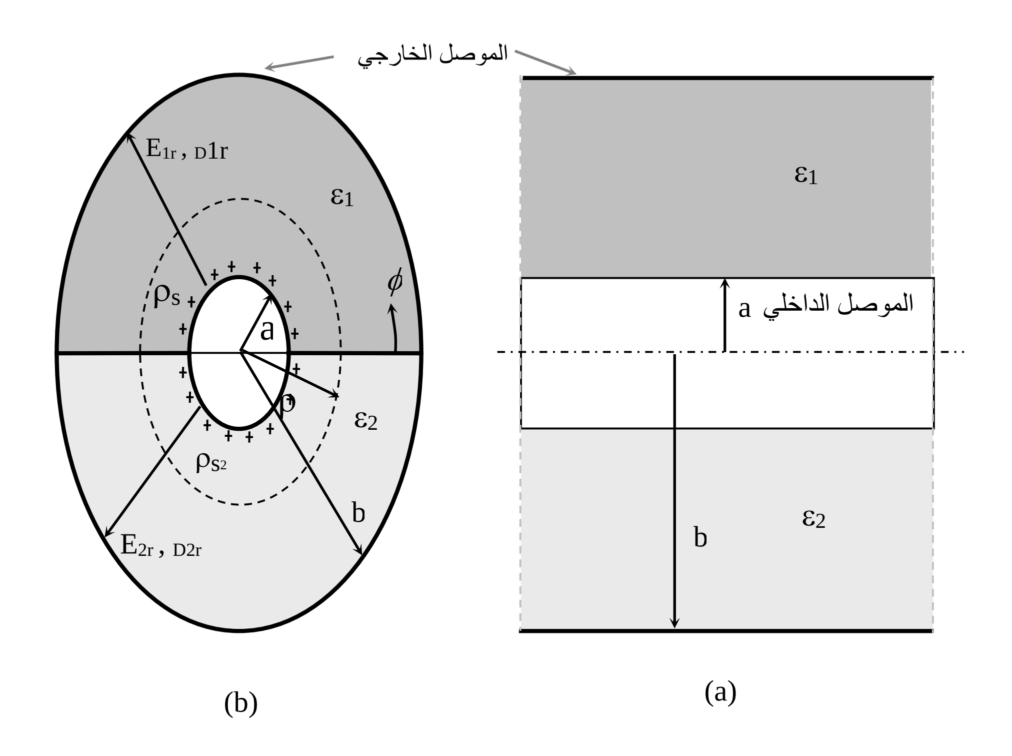
للوجه السفلي للمادة العازلة. أما سعة المواسع C فهي كما يلي :-

$$C = \frac{q}{V_0} = \frac{\rho_s\ A}{V_0} = \frac{V_0\ \varepsilon_r\ \varepsilon_0\ A}{V_0\ d} = \frac{\varepsilon_r\ \varepsilon_0\ A}{d} \quad F$$

وبالتالي فإن سعة المواسع لا تعتمد على الشحنات المخزنة أو فرق الجهد بين الصفيحتين وإنما على خصائص الوسط ε **ومساحة الصفيحتين A والمسافة بينهما d، وبالتالي فإن قيمتها يجب أن تكون دائماً موجبة.**

مثال (1-13):- يبين الشكل (1-21) الكابل المحوري الذي يتكون من موصل داخلي نصف قطره a وموصل خارجي نصف قطره b يفصل بينهما في المنطقة $0 \le \phi < \pi$ مادة عازلة سماحيتها $\varepsilon_1 \ \mathrm{F/m}$ وأما المنطقة $\pi \le \phi < 2\pi$ فإن سماحية مادتها $\varepsilon_2 \ \mathrm{F/m}$ ، في ضوء ذلك (i) أوجد مواسعة هذا الكابل C لكل وحدة طول F/m.

(ii) إذا كان فرق الجهد بين الموصلين هو 100 V وكانت a = 2 mm و b = 10 mm و $\varepsilon_1 = \varepsilon_0$ و $\varepsilon_2 = 2\varepsilon_0$ فأوجد كثافة الشحنات السطحية على سطح الموصل الداخلي ρ = a وعلى سطح الموصل الخارجي ρ = b وأوجد سعة الكابل لكل وحدة طول في هذه الحالة.



الشكل(1-21):-الكابل المحوري بمادتين عازلتين تفصلان الموصل الداخلي عن الخارجي (a) مقطع طولي (b) مقطع أمامي.

الحــــل:-

(i) إذا كان جهد الموصل الداخلي $V_0\ V$ **وجهد الموصل الخارجي 0 V وكذلك إذا كانت كثافة الشحنات السطحية على الموصل الداخلي في المنطقة** $0 \le \phi < \pi$ **هي** $\rho_{S1}\ \ C/m^2$ **(أو كثافة الشحنات الخطية** $\rho_{L1}\ \ C/m$ **) وفي المنطقة** $\pi \le \phi < 2\pi$ **هي** $\rho_{S2}\ \ C/m^2$ **(أو كثافة الشحنات الخطية** $\rho_{L1}\ \ C/m$ **)،**

وبتطبيق قانون جاوس على أسطوانة نصف قطرهـا $a < \rho < b$ **بطول L ومن التماثل (لن يكون هناك سوى** $D\rho$**أو**$E\rho$ **) ينتج ما يلي :-**

$$(D_{\rho 1} + D_{\rho 2})\ \pi \rho L = (\rho_{S1} + \rho_{S2})\ \pi a L$$

أو

$$D_{\rho 1} + D_{\rho 2} = \frac{a}{\rho}\ (\rho_{S1} + \rho_{S2}) \quad C/m^2$$

وبما أن $D_{\rho 1} = \varepsilon_1 E_{\rho 1}$ **و** $D_{\rho 2} = \varepsilon_2 E_{\rho 2}$ **وحيث إن** $E_{\rho 1} = E_{\rho 2} (= E_\rho)$ **(المجالات الكهربائية الماسة للسطح الفاصل بين الوسطين** ε_1 **و** ε_2 **عند** $\phi = 0$ **أو** $\phi = \pi$ **مستمرة) فيمكن كتابة العلاقة الأخيرة كما يلي :-**

$$E_\rho\ (\varepsilon_1 + \varepsilon_2) = \frac{a}{\rho}\ (\rho_{S1} + \rho_{S2})$$

أو أن

$$E_\rho = \frac{a}{\rho\ (\varepsilon_1\ +\ \varepsilon_2)}\ \ \rho_{S1} + \rho_{S2})$$

يتم الحصول من العلاقة التي تربط المجال الكهربائي مع فرق الجهد بين الموصلين على

$$-V_0 = -\int_a^b \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L} = -\frac{a\ (\rho_{S1} + \rho_{S2})}{(\varepsilon_1\ +\ \varepsilon_2)}\ \ Ln\ \ (b/a)$$

أو أن

$$V_0 = \pi a\ (\rho_{S1} + \rho_{S2})\ \frac{\text{Ln}\ (b/a)}{\pi\ (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)} = (\rho_{L1} + \rho_{L2})\ \frac{\text{Ln}\ \ (b/a)}{\pi\ (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}$$

وبالتالي فإن سعة الكابل لكل وحدة طول هي :

$$C = \frac{(\rho_{L1} + \rho_{L2})}{V_0} = \frac{\pi\ (\varepsilon_1 + \varepsilon_2)}{\text{Ln}\ \ (b/a)} \qquad F/m$$

وتبين العلاقة الأخيرة أن سعة الكابل لكل وحدة طول تكون مكونة من جزأين حيث

يمثل كل جزء منطقة. فالجزء $\frac{\pi\,\varepsilon_1}{Ln\,(b/a)}\,F/m$ يمثل السعة للمنطقة

$0 \le \phi < \pi$ والجزء $\frac{\pi\,\varepsilon_2}{Ln\,(b/a)}\,F/m$ يمثل السعة للمنطقة $\pi \le \phi < 2\pi$

وحيث أنهما متصلان على التوازي فإن مجموعها يشابه وصل مقاومتين على التوالي

(كما هو معروف). وإذا كانت $\varepsilon_1 = \varepsilon_2 = \varepsilon$ فإن سعة الكابل المحوري لكل

وحدة طول تصبح

$$C = 2\pi\,\varepsilon / Ln\,(b/a) \quad F/m$$

من شروط الحدود وعلى السطح الداخلي $\rho = a$ فإن

$D_{\rho1} = \varepsilon_1\,E_{\rho1} = \rho_{s1} = \varepsilon_1\,E_\rho$ و $D_{\rho2} = \varepsilon_2\,E_{\rho2} = \rho_{s2} = \varepsilon_2\,E_\rho$ أو أن

$\frac{D_{\rho1}}{D_{\rho2}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ و $\frac{\rho_{S1}}{\rho_{S2}} = \frac{\varepsilon_1}{\varepsilon_2}$ وبالتالي فإن

$$V_0 = a\,(1+\frac{\varepsilon_2}{\varepsilon_1})\;\rho_{S1}\;\frac{Ln\,(b/a)}{(\varepsilon_1+\varepsilon_2)} = \frac{a\,\rho_{S1}}{\varepsilon_1}\,Ln\,(b/a)\;\;V$$

أو

$$V_0 = \frac{a\,\rho_{S2}}{\varepsilon_2}\;Ln\,(b/a)\quad V$$

وبالتالي فإن

$$\rho_{S1} = \frac{\varepsilon_1\,V_0}{a\,Ln\,(b/a)}\;\;C/m^2$$

و

$$\rho_{S2} = \frac{\varepsilon_2\,V_0}{a\,Ln\,(b/a)}\;\;C/m^2$$

وعند السطح الداخلي للموصل الخارجي $\rho = b$ فهي كما يلي:-

$$\rho_{S1} = \frac{\varepsilon_1\,V_0}{b\,Ln\,(b/a)}\;\;C/m^2$$

و

$$\rho_{S2} = \frac{\varepsilon_2\,V_0}{b\,Ln\,(b/a)}\;\;C/m^2$$

وللقيم المعطاة في هذا المثال فإن كثافة الشحنات السطحية عند $\rho = a$ تكون كما يلي:-

$$\rho_{S1} = \frac{10^{-4}}{72\,\pi\,Ln\,5} = 0.275\quad \mu C/m^2$$

و $\rho_{S2} = 0.55 \quad \mu C/m^2$

أما على السطح الداخلي للموصل الخارجي ρ = **b** فتكون:-

$$\rho_{S1} = 0.55 \quad \mu C/m^2$$

و $\rho_{S2} = 0.11 \quad \mu C/m^2$

ولهذه القيم فإن سعة هذا الكابل لكل وحدة طول تصبح $C = 51.8 \ pF/m$

الطاقة الكهربائية:- يمثل وجود الشحنات على موصلي المواسع طاقة كهربائية مخزنة في هذا المواسع (في الوسط الفاصل بين الموصلين) وتتكون هذه الطاقة نتيجة للطاقة التي بذلت لشحن المواسع. وكما هو معروف فإن الجهد **V** يمثل كمية الشغل المبذول لنقل وحدة شحنة من نقطة إلى أخرى ويمكن كتابته كما يلي:

$$V = \frac{dW_e}{d\,q} \qquad V$$ **(32-1)**

حيث إن dW_e يمثل الشغل الكهربائي المبذول على شحنة **dq**، أو أن

$V = \frac{q}{C} = \frac{dW_e}{dq}$ وبالتالي فإن $d\,W_e = \frac{1}{C}\,q\;d\,q$ ، وبمكاملة الطرفين ينتج ما يلي:-

$$W_e = \frac{q^2}{2C} = \frac{1}{2} CV^2 = \frac{1}{2} qV \qquad J$$

(33a-1)

$$W_e = \frac{1}{2} \iiint_V \mathbf{E} \bullet \mathbf{D} \quad dV \qquad J$$

أو (33b- 1)

وتمثل العلاقة (33-1) كمية الطاقة الكهربائية المخزنة في مواسع أو كمية الشغل المبذول في شحن هذا المواسع. وإذا أعتبر حيزاً صغيراً أو حجماً صغيراً على شكل متوازي مستطيلات في وسط سماحيته $\varepsilon \ \ F/m$ ومساحة قاعدة هذا المتوازي S وارتفاعه d بحيث إن $V = Sd \ \ m^3$ تمثل الحجم المحصور بين لوحي المواسع فإن كثافة الطاقة تصبح كما يلي :-

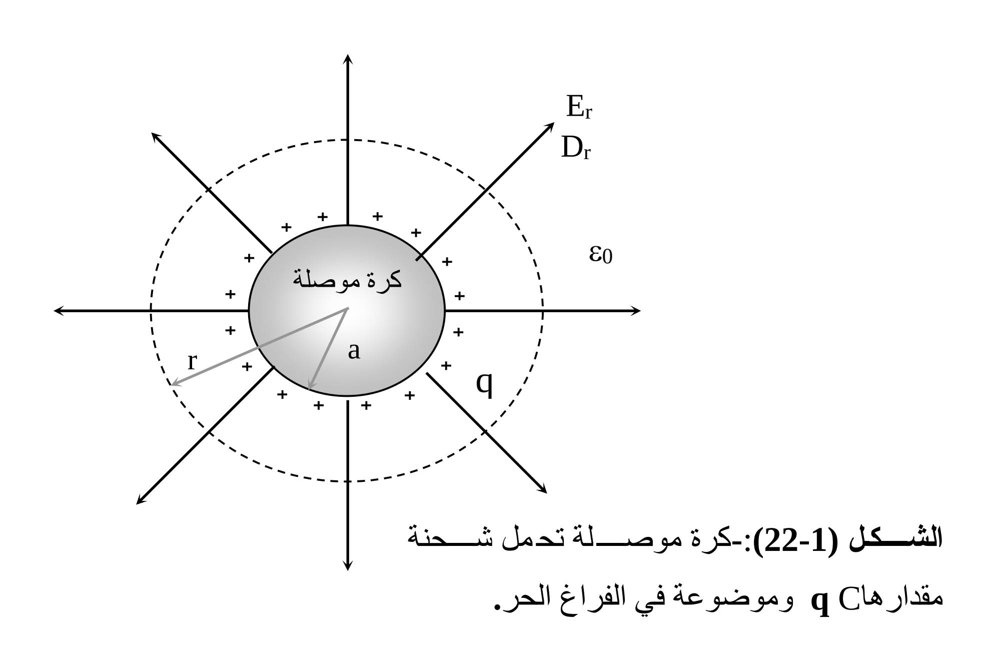
$$\frac{W_e}{V} = w_e = \frac{1}{2} \ \varepsilon \ E^2 \qquad J/m^3$$

(34a-1)

$$w_e = \frac{1}{2} \mathbf{E} \bullet \mathbf{D} \qquad J/m^3$$

(34b-1)

مثال (14-1):-يبين الشكل (22-1) كرة موصلة جيدة التوصيل نصف قطرها a وموضوعة في الفراغ الحر، فإذا كانت الشحنات التي تحملها هي q C فأوجد(i):- المجال الكهربائي وكثافة الفيض الكهربائي الناتج عن هذه الكرة في المنطقة $0 \leq r < \infty$ **. (ii) جهد هذه الكرة . (iii) الطاقة الكهربائية المخزنة في الفراغ الحر حول هذه الكرة.**



الشـــكل (22-1):-كرة موصـــلة تحمل شـــحنة مقدارها **q** C وموضوعة في الفراغ الحر.

الحـــل:-

تتوزع الشحنة q على سطح الكرة بشكل منتظم على شكل كثافة شحنات سطحية $\rho_S = q/(4\pi a^2)\ \ C/m^2$.

(i) في هذه الحالة ومن التماثل يكون كلٌ من المجال الكهربائي E وكثافة الفيض الكهربائي D باتجاه ar فقط ولا يتغيران مع ϕ و θ ، أو أن $\mathbf{D} = D_r(r)\ \mathbf{a}_r$ **و** $\mathbf{E} = E_r(r)\ \mathbf{a}_r$ **وإذا ما تم اختيار سطح جاوس المقفل على شكل سطح كرة نصف قطرها** $0 \le r < \infty$ **فإنه وبعد تطبيق قانون جاوس وفي ضوء ما سبق يتم الحصول على ما يلي:-**

$$D_r\ 4\pi r^2 = q \Rightarrow D_r = \frac{q}{4\pi r^2}\quad C/m^2$$

أو أن $E_r = \dfrac{q}{4\pi \varepsilon_0 r^2}\ \ V/m$ **، أما E و D للمنطقة** $r<a$ **فإن كلاهما يكون مساوياً للصفر.**

(ii) لإيجاد الجهد يتم استخدام العلاقة

$$V = -\int_{\infty}^{r} \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L}$$

أو أن الجهد للمنطقة $a \le r < \infty$ هو كما يلي:-

$$V = -\int_{\infty}^{r} \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r'^2} dr' = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 r} \qquad V$$

أما في المنطقة $0 \le r < a$ فهو كما يلي:-

$$V = -\left[\int_{\infty}^{a} + \int_{a}^{r} \mathbf{E} \bullet d\mathbf{L}\right] = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0 a} \qquad V$$

يلاحظ أن الكرة سطح ووسط متساوي الجهد لأن المجال الكهربائي فيها يكون مساوياً للصفر.

تكون سعة الكرة كما يلي $C = q/V = 4\pi\varepsilon_0 a \quad F$:-

وبالتالي فإن الطاقة المخزنة في الفراغ الحر المحيط بالكرة هي كما يلي :-

$$W\left(=\frac{1}{2}qV\right) = \frac{1}{2}CV^2 = \frac{1}{2}4\pi\varepsilon_0 a \frac{q^2}{(4\pi\varepsilon_0 a)^2} = \frac{q^2}{8\pi\varepsilon_0 a} \quad J$$

التيار المستمر (Direct Current DC)وموصلية الأوساط

إذا تركت شحنة كهربائية حرة في مجال كهربائي فإنها ستتحرك تبعاً للقوى التي تؤثر عليها وتمثل حركتها التيار الكهربائي I (أو i) ووحداته C/s أو أمبير A. ويمكن تعريف التيار الكهربائي من خلال تحديد الشحنات التي تمر مثلاً عبر مساحة معينة في فترة زمنية معينة أو أنه يمثل معدل تغير الشحنات مع الزمن كما يلي:-

$$i = \frac{d\,q}{d\,t} \qquad A$$

(35-1)

تتكون المواد ، كما سبق ذكره، من ذرات وتتكون الذرة من نواة بها شحنات موجبة وأجسام غير مشحونة ويدور حولها في مدارات مختلفة عدد من الشحنات السالبة والتي تكون مساوية للشحنات الموجبة. ومن البديهي أن تتأثر الشحنات السالبة الواقعة في أبعد المدارات عن النواة لأدنى قوة جذب تربطها بالنواة. يمكن أن تكون هذه القوة متدنية في قيمتها بحيث إنها تكون أقل من أو تساوي على وجه التقريب القوة التنافرية بين الشحنات السالبة والقوة العشوائية الناتجة عن الطاقة الحرارية التي تكتسبها الشحنات السالبة. وفي هذه الحالة فإن الشحنات السالبة الواقعة في ابعد المدارات تنفصل عن ذراتها وتصبح حرة في حركتها وتجوالها وينتج عن ذلك عدد هائل من الشحنات الحرة التي يمكن أن تتحرك بشكل منتظمإذا ما تأثرت بمجال كهربائي خارجي.

ويطلق على المادة في هذه الحالة بأنها مادة موصلة (جيدة التوصيل). أما إذا كانت القوة التجاذبية المشار إليها أعلاه أكبربكثير من القوة التنافرية والعشوائية فإن فرصة انتزاع هذه الشحنات من ذراتها بمجالات كهربائية خارجية تصبح ضئيلة إلا إذا وصلت شدة هذه المجالات إلى قيمٍ عالية جداً تدعى بقيم الانهيار كما يحدث مثلاً في حالة البرق وأنابيب الإنارة التفريغية. ويطلق على المادة في هذه الحالة بالمادة العازلة حيث إن عدد الإلكترونات (الشحنات السالبة) الحرة يكون متدنياً. وما بين المواد الأولى والثانية تقع المواد شبه الموصلة. فمثلاً يتوفرفي المواد الموصلة عدد كبير من الشحنات السالبة الحرة التي تركت ذراتها وهي صغيرة في حجمها ووزنها وقادرة على الحركة في أي اتجاه تقريباً تبعاً للقوى المؤثرة عليها. أما الذرات المتروكة فإنها تمثل شحنات موجبة غير أنها كبيرة في حجمها وثقيلة جداً (مقارنة بالشحنات السالبة) ويصعب عليها الحركة فعلياً. تتحرك الشحنات السالبة التي تركت ذراتها نتيجة لعدة قوى تؤثر عليها منها التنافر مع شحنات سالبة أخرى وتجاذبها مع شحنات موجبة إضافة لأثر الطاقة الحرارية التي تكتسبها من المحيط التي تتواجد فيه، ويمكن أن تصطدم هذه الشحنات السالبة أثناء حركتها بأجسام غير مشحونة تتواجد في طريق حركتها. إذا ما أثر على الوسط الذي به هذه الشحنات السالبة مجال كهربائي خارجي

فإنه يحرك هذه الشحنات باتجاهه. فمثلاً يمكن أن تبدأ الشحنة من سرعة ابتدائية تساوي الصفر ثم تبدأ بالتسارع نتيجة هذا المجال المؤثر وتصل سرعتها إلى قيمة عظمى تؤول بعدها إلى الصفر وذلك إما لكونها اقتربت من شحنة سالبة أخرى أو لأنها اجتذبت إلى شحنة موجبة أو لأنها اصطدمت مع جسم أخر غير مشحون. ثم تبدأ تسارعها من جديد لتقطع في كل مرة مسافة قد تختلف عن سابقتها وتنتهي بسرعة قصوى تختلف عما قبلها. ولكن إذا ما تم اختيار نقطتين متباعدتين مثلاً x1 و x2 والمسافة ما بينهما Δx **(أكبر بكثير من قطر الذرة) وتم توقيت الزمن اللازم لشحنة أو مجموعة من الشحنات لتنتقل من النقطة x1 إلى النقطة x2 تحت تأثير مجال كهربائي خارجي E، ووجد أنه يساوي** Δt **فإنه يمكن تعريف الكمية** $(\Delta x / \Delta t)$ **على أنها سرعة جريان الشحنة (أو مجموعة الشحنات) وهي لا تساوي سرعتها اللحظية. ويمكن القول أن هذه السرعة تمثل معدل سرعة الشحنة السالبة وتسمى بسرعة الجريان (Drift Velocity) vd أو**

$$\mathbf{v}_d = \mu \, \mathbf{E} \quad \text{(37-1)}$$

حيث إن μ تمثل سهولة تنقل الشحنات السالبة في الوسط ويطلق عليه أسم التنقلية (Mobility) وتكون وحداتها (m^2 / sV). فإذا كانت كثافة هذه الشحنات الحجمية في وسط ما هي $\rho_v \quad C/m^3$ وتسير بسرعة جريان $v_d \quad m/s$ عابرة مثلاً مساحة مقطع $A \;\; m^2$ فإنه يمكن تعريف ذلك على انه التيار أو

$$i = \rho_v \, v_d \qquad \textbf{(38a-1)}$$

أو أن كثافة التيار السطحية تكون كما يلي:-

$$J = i/A = \rho_v \, v_d \qquad \textbf{(38b-1)}$$

وتكون كثافة التيارJ متجها (J) يحدد من متجه المساحة A أومن خلال اتجاه سرعة الجريان vd ومن قانـون أوم

(Ohm's Law) الذي يربط الجهد بالتيار عبر المقاومة (V = IR) وحيث إن V = EL و I = JA و(R = L/(σ A، علماً بأن L يمثل مسار التيار (طول على الخط الممثل للمجال الكهربائي) فإن

$$\mathbf{J} = \sigma \mathbf{E} \qquad A/m^2 \qquad \textbf{(39-1)}$$

حيث إن σ هي موصلية (Conductivity) الوسط. وتمثل المعادلة (1-39) قانون أوم عند أي نقطة لوسط له موصلية $\sigma \ (\Omega m)^{-1}$ ويبين هذا القانون أن كثافة التيار السطحية $J \quad A/m^2$ (والتي تمثل حركة الشحنات) تتناسب مع المجال الكهربائي الخارجي E الذي ينتج هذا التيار عبر ثابت الوسط (الموصلية σ).

وتعتبر الموصلية σ مقلوب المقاومية (Resistively) $\rho = \sigma^{-1} \ \Omega m$. وتعكس المقاومة المشار إليها أعلاه أنه لتحريك شحنة من نقطة إلى أخرى في وسط ما فلابد من بذل شغل للتغلب على القوى العديدة التي تؤثر على هذه الشحنة مثل القوى التنافرية والتجاذبية والتصادمية والعشوائية الناجمة عن الطاقة الحرارية والتي في مجملها تشكل مقاومة لحركة الشحنات من نقطة إلى أخرى. وتقل موصلية معظم المواد (أو تزداد مقاومتها) مع زيادة درجة الحرارة نظراً لان ذلك يرفع من القوى العشوائية الناجمة عن الطاقة الحرارية. ويبين الجدول (1-2) عدداً من المواد وموصليتها عند درجة حرارة الغرفة $20^{o}\,C$

الجدول (2-1):-موصلية عدد من المواد $\sigma\ (\Omega m)^{-1}$.

اسم المادة	تصنيف المادة	موصليتها $\sigma\ (\Omega m)^{-1}$
الكوارتز	عازل	10-17
المطاط	عازل	10-15
الزجاج	عازل	10-12
ماء مقطر	عازل ضعيف	10-4
التربة الرملية الجافة	عازل ضعيف	10-3
جسم الحيوان	موصل ضعيف	0.2
جرمانيوم	موصل ضعيف	2
ماء البحر	موصل متوسط	4
السليكون	موصل	103
الكربون	موصل	3 × 104
الحديد الزهر	موصل جيد	106
القصدير	موصل جيد	5 × 106

الألمنيوم	موصل جيد	**3.5 × 107**
الذهب	موصل جيد	**4.1 × 107**
النحاس	موصل جيد	**5.7 × 107**

يمكن كتابة العلاقة التي تحدد المقاومة R أو المواصلة G(Conductance) كما يلي:-

$$R = \int dR = \int_L dL/(\sigma A) \qquad \Omega \qquad \textbf{(39a-1)}$$

$$G = \int dG = \int_A \sigma\, dA/L \qquad (\Omega)^{-1} \qquad \textbf{(39b-1)}$$

ويتم من العلاقات (1-37) - (1-39) استنتاج أن $\mathbf{J} = \sigma\mathbf{E} = \rho_v \mathbf{v}_d = \rho_v\, \mu\, \mathbf{E}$ **أو**

$$\sigma = \rho_v\, \mu \qquad (\Omega m)^{-1} \qquad \textbf{(40a-1)}$$

$$\mu = \sigma/\rho_v \qquad m^2/sV \qquad \textbf{(40b-1)}$$

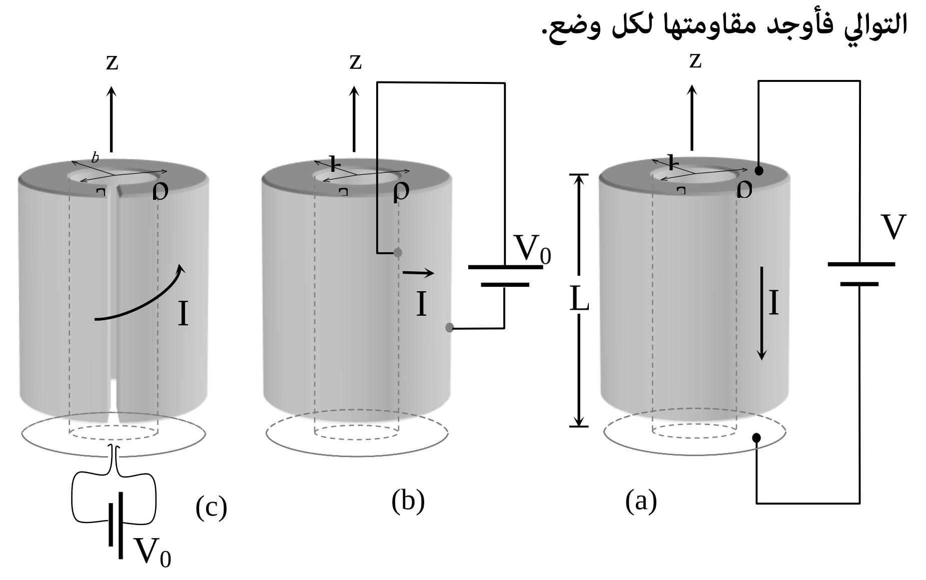
وتبين العلاقة (40a-1)أن موصلية الوسط تزداد بازدياد كثافة الشحنات والتنقلية. وتبين العلاقة (40b-1) أن التنقلية أو سهولة حركة الشحنات تتناقص بازدياد كثافة الشحنات نظراً لان تزايد الشحنات يزيد من تنافرها مع بعضها ويؤدي إلى ازدحام الوسط بهذه الشحنات. ومن الجدير بالذكر أن التيار المستمر (DC) ينتج عن حركة الشحنات الحجمية التي تسير بسرعة ثابتة تمثل سرعة الجريان. وفي الواقع إن كمية الشحنات في أي حجم من المادة يبقى مساوياً للصفر سواءً أكان هناك تيار أم لم يكن (مجموع الشحنات الموجبة والشحنات السالبة متساويان وبالتالي فإن مجموع الشحنات يكون صفراً). في ضوء ذلك إذا تم تطبيق قانون جاوس على كثافة التيار المبين في العلاقة (38a-1) فإنه يتم استنتاج قانون كيرشوف للتيار لسطح مقفل S $(\Sigma I = 0)$ أو عند نقطة كما يلي:-

$$\oiint_S \mathbf{J} \bullet \mathbf{dS} = 0 \qquad (41a-1)$$

وبالتالي

$$\nabla \bullet \mathbf{J} = 0 \qquad (41b-1)$$

مثال (1-15):- يبين الشكل (1-23) اسطوانة نحاسية مفرغة وموصولة بمصدر في ثلاثة أوضاع ، فإذا كان طولها Lونصفا قطريها الداخلي والخارجي هما a و b على التوالي فأوجد مقاومتها لكل وضع.



الشكل (1-23):- اسطوانة نحاسية مفرغة وموصولة مع مصدر يصدر تياراً باتجاه (a) محور الاسطوانة (b) قطر الاسطوانة (c) باتجاه التفافي.

الحـــل:-

عندما يكون التيار باتجاه محور الاسطوانة، الشكل (23a-1) ، تكون المقاومة dR كما يلي:-

$$dR = \frac{dz}{\sigma\, \rho\, d\rho\, d\phi} \quad \Omega$$

أو

$$G = \frac{\sigma\, 2\,\pi}{L}\int_a^b \rho\, d\rho = \frac{\sigma\, \pi\, (b^2 - a^2)}{L} \quad (\Omega)^{-1}$$

أو أن المقاومة تكون $R = L / \{\sigma\, \pi\, (b^2 - a^2)\} \quad \Omega$

وعندما يكون التيار باتجاه قطري، الشكل (23b-1) ، تكون المقاومة dR كما يلي :-

$$dR = \frac{d\rho}{\sigma\, \rho d\phi\, dz} \Rightarrow R = \frac{1}{2\pi\sigma L}\int_a^b \frac{d\,\rho}{\rho} \Rightarrow\Rightarrow R = \frac{Ln\,(b/a)}{2\pi\sigma L} \quad \Omega$$

أما عندما يكون التيار باتجاه التفافي، الشكل (23c-1) ، فإن المقاومة dR تكون كما يلي :-

$$dR = \frac{\rho\, d\phi}{\sigma\, d\rho\, dz} \quad \Rightarrow\Rightarrow \quad G = \frac{\sigma\, L}{2\,\pi}\int_a^b \frac{d\rho}{\rho} = \frac{\sigma\, L}{2\,\pi} Ln\,(b/a)$$

أو أن المقاومة في هذه الحالة تكون $R = 2\,\pi / \{\sigma\, L\, Ln(b/a)\} \quad \Omega$

المصادر والمجالات المغناطيسية الثابتة مع الزمن :

يبحث هذا الفصل في المصادر والمجالات الكهرومغناطيسية (Magnetic Fields) الثابة مع الزمن، هذا وقد سبق وتم تقديم المصادر والمجالات الكهربائية الثابة مع الزمن والتي تمثل النصف الأول وسيتم هنا تقديم النصف الثاني وهي المصادر والمجالات المغناطيسية الثابة مع الزمن. سيتم أولاً تقديم المصادر المغناطيسية (التيارات الكهربائية) وبعد ذلك يتم الانتقال إلى إيجاد المجالات المغناطيسية المختلفة الناتجة من هذه المصادر وكذلك إيجاد الآليات التي تربط بين هذه المصادر والمجالات.

المصادر المغناطيسية Magnetic Sources:

تعرف الإنسان على المصادر المغناطيسية منذ زمن بعيد وذلك على شكل حجر أسود (مكون من الحديد) كان موجوداً في الطبيعة وكانت له خصائص جذب المواد الحديدية الأخرى. وسيتم بحث هذا النوع من المصادر عند معالجة المواد المغناطيسية في الفصول القادمة. أما المصادر التي سيتم التركيز عليها هنا فهي التيارات الكهربائية

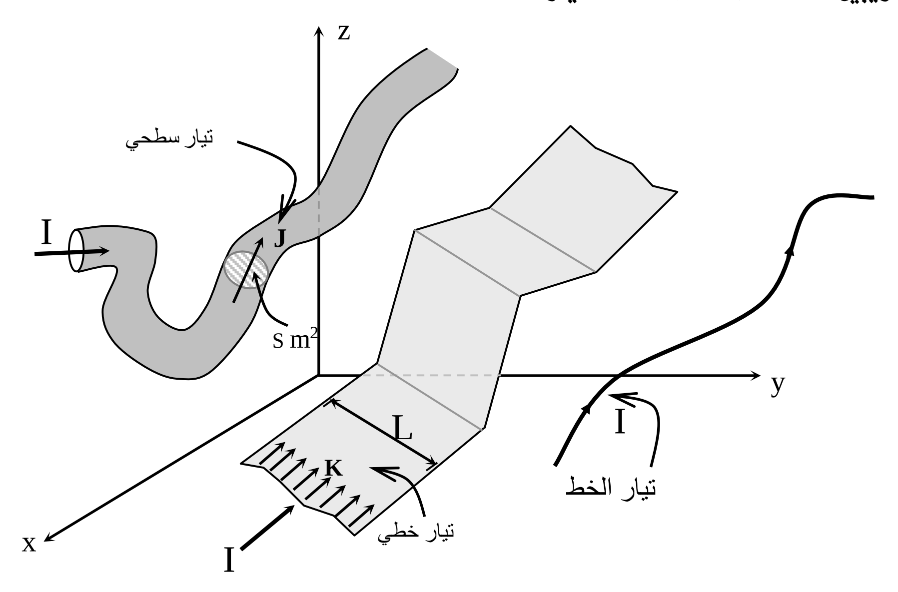
وهنا فإن الحديث سيكون عن التيار المستمر الذي سبق وتم تقديمه في الفصل السابق. وتأتي هذه التيارات بأشكال مختلفة وذلك كما يلي :-

تيار الخط (Line Current) أو التيار:- وهو تيار يسري في سلك موصل رفيع ويرمز له بالرمز I ووحدته الأمبير A.

تيار خطي :-(Linear Current) وهو تيار مقداره مثلاً I A يسري بشكل منتظم أو غير منتظم في صفيحة معدنية رقيقة جداً عرضها L (قد لا يكون ثابتاً)ويعبر عنه بكثافة التيار الخطي ويرمز له بالرمز K، $\mathbf{K} = \mathrm{I}/\mathbf{L} \;\; \mathrm{A/m}$.

تيار سطحي :-(Surface Current) وهو تيار مقداره I A يسري في سلك منتظم أو غير منتظم في موصل مساحة مقطعه (ثابتة أو متغيرة) Sويعبر عنه عادة بكثافة التيار ويرمز له بالرمز $\mathbf{J}\,(=\mathrm{I}/\mathbf{S}) \;\; \mathrm{A/m^2}$.

ويبين الشكل (24-1) هذه التيارات المختلفة.



الشكل (24-1):-الأشكال المختلفة للتيارات الكهربائية، تيار الخط I A وكثافة التيار الخطي K A/m وكثافة التيار J A/m2.

كثافة الفيض المغناطيسي وقانون بيوت- سافارت

إذا كان المصدر عبارة عن تيار يمر في موصل مساحة مقطعه $S^{'}\ \ m^2$ وكانت كثافة التيار التي تمر في هذا الموصل هي $\mathbf{J}\ \ \mathrm{A/m^2}$ كما هو مبين في الشكل (1-25) فإن قانون بيوت - سافارت

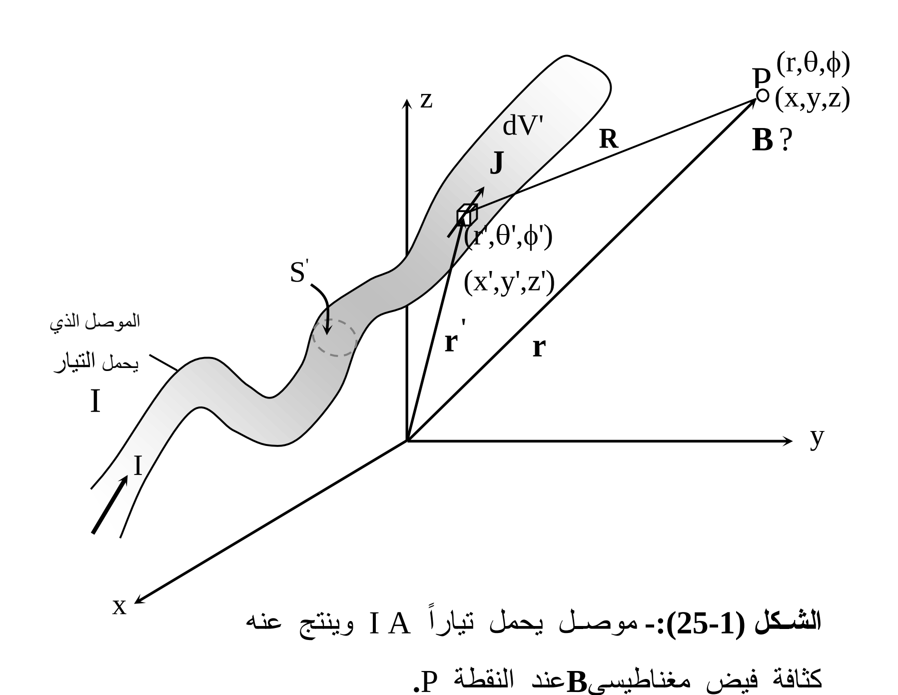
(Biot Savart Law)

يربط بين كثافة الفيض المغناطيسي **B(Magnetic Flux density)** وهذا التيار. فإذا أخذ حجم صغير من هذا الموصل $\mathrm{dV}^{'}$ بمساحة مقطع $\mathrm{dS}^{'}$ وطول $\mathrm{dL}^{'}$ عند النقطة $(x^{'}, y^{'}, z^{'})$ أو $(r^{'}, \theta^{'}, \phi^{'})$ فإن كثافة الفيض المغناطيسي الناتج عن هذا الجزء من المصدر عند النقطة **P (x, y, z)** أو $\mathbf{P}(r, \theta, \phi)$ هي **dB**. يمكن اعتبار هذا الجزء الصغير من المصدر على أنه مصدر نقطي وبالتالي فإن ناتجه يكون متماثلاً وتكون العلاقة بين **dB** و**J** كما يلي :-

$$\mathbf{dB} = \frac{\mu\, \mathbf{J}\,(\mathbf{r}^{'})\, dV^{'} \times \mathbf{a}_R}{4\,\pi\ \ R^2} \qquad Wb/m^2$$

(42-1)

حيث إن μ هي الخاصية المغناطيسية للوسط أو ثابت الوسط وتدعى بالنفاذية ووحداتها **H/m**، و $\mathbf{a}_{\mathrm{R}} \equiv \frac{\mathbf{R}}{|\mathbf{R}|} = \frac{\mathbf{r} - \mathbf{r}^{'}}{|\mathbf{r} - \mathbf{r}^{'}|}$ متجه وحدة يؤخذ باتجاه **R**.

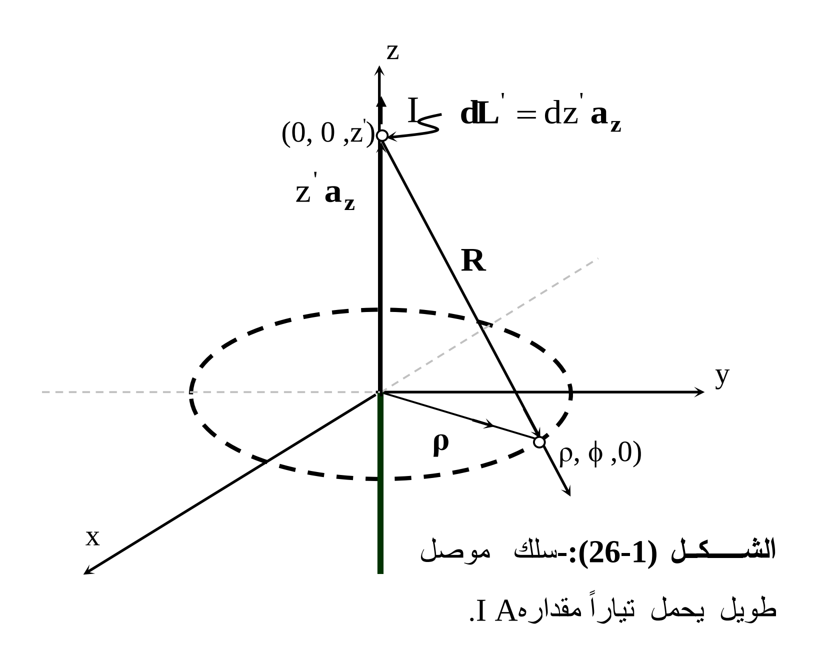


الشكل (1-25):- موصل يحمل تياراً I A وينتج عنه كثافة فيض مغناطيسى **B** عند النقطة P.

يلاحظ من العلاقة (1-42) قانون التربيع العكسي إضافة إلى أن اتجاه dB مرتبط باتجاه J وذلك تبعاً لقاعدة اليد اليمنى. أي أنه إذا ما تم تجهيز اليد اليمنى بحيث تكون أصابعها باتجاه J ويتم ثني الأصابع باتجاه aR فإن الإبهام يكون محدداً لاتجاه dB. وبالتالي فإن قيمة B عند النقطة P تصبح كما يلي :-

$$\mathbf{B(r)} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{V'} \frac{\mathbf{J(r')} \times \mathbf{a}_R}{R^2} dV' \quad (43\text{-}1)$$

مثال-(1-16):يبين الشكل (1-26) سلكاً موصلاً طويلاً يمتد إلى ما لانهاية في اتجاه z ويحمل تياراً مقداره I A. أوجد كثافة الفيض المغناطيسي B الناتجة عن هذا السلك عند النقطة $(\rho, \phi, 0)$.



الشــكـل (1-26):-سلك موصل طويل يحمل تياراً مقداره I A.

الحـــل:-

نظراً للتماثل فإن كثافة الفيض المغناطيسي B لن تعتمد على z و ϕ وإنما فقط على ρ وبتطبيق العلاقة (1-43) علماً بان التكامل الحجمي يتم استبداله بتكامل خطي كما يلي:-

$$\mathbf{B}(\rho) = \frac{\mu}{4\pi} \int_{L'} \frac{I\,\mathbf{dL}' \times \mathbf{a}_R}{R^2}$$

حيث إن

$$\mathbf{a}_R = \mathbf{R}/|\mathbf{R}| \text{ و } |\mathbf{R}| = \sqrt{\rho^2 + z'^2} \text{ و } \mathbf{R} = \rho\,\mathbf{a}_\rho - z'\mathbf{a}_z \text{ و } \mathbf{dL}' = dz'\mathbf{a}_z$$

وبالتالي

$$B_\phi(\rho) = \frac{\mu\, I\, \rho}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \frac{dz'}{(\rho^2 + z'^2)^{3/2}} = \frac{\mu\, I\, \rho}{2\pi} \int_{0}^{\infty} \frac{dz'}{(\rho^2 + z'^2)^{3/2}}$$

يتم إجراء التكامل الأخير عن طريق التعويض أو $z' = \rho \tan\theta$ و

$(\rho^2 + z'^2)^{3/2} = \rho^3 / \cos^3\theta$ و $dz' = \rho d\theta / \cos^2\theta$ وعندما تكون z

= 0 فإن $\theta = 0$ وعندما تكون $z = \infty$ فإن $\theta = \pi/2$ ، أو

$$B_\phi(\rho) = \frac{\mu I \rho}{2\pi\rho^2} \int_0^{\pi/2} \cos\theta \, d\theta = \frac{\mu I}{2\pi\rho} \qquad Wb/m^2$$

مثال (1-17):- يبين الشكل (1-27) حلقة مكونة من سلك موصل يسري فيها تيار I A. إذا كان نصف قطر الحلقة a وموضوعة في المستوى xy ومركزها عند نقطة الأصل فأوجد كثافة الفيض المغناطيسي عند النقطة (0, 0, z) وكذلك عند مركز الحلقة.

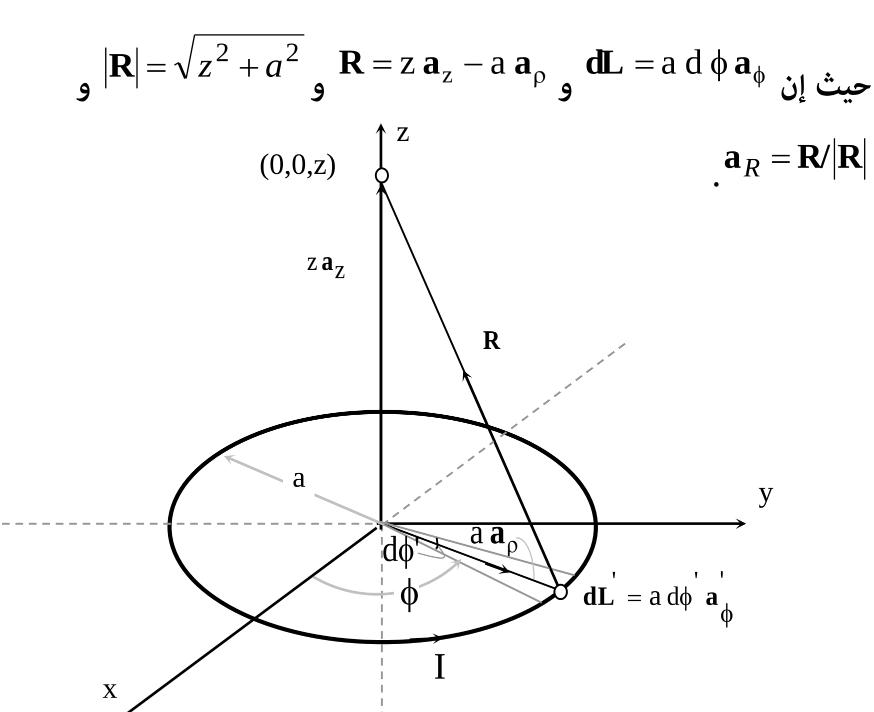
الحـــل:-

من التماثل، يتوقع أن تكون كثافة الفيض المغناطيسي على محور الحلقة في اتجاه واحد هو اتجاه z ولا تعتمد على ϕ (يتغير ذلك إذا كانت النقطة المراد إيجاد B عندها تقع بعيداً عن المحور). بتطبيق العلاقة (1-43) بعد استبدال التكامل الحجمي بتكامل خطي، أو أن

$$\mathbf{B}(0,0,z) = \frac{\mu}{4\pi}\int_{L'} \frac{I\,\mathbf{dL}' \times \mathbf{a}_R}{R^2}$$

حيث إن $\mathbf{dL} = a\,d\phi\,\mathbf{a}_\phi$ و $\mathbf{R} = z\,\mathbf{a}_z - a\,\mathbf{a}_\rho$ و $|\mathbf{R}| = \sqrt{z^2 + a^2}$ و

$\mathbf{a}_R = \mathbf{R}/|\mathbf{R}|$.



الشكل (1-27):-حلقة موصلة تحمل تياراً I Aوموضوعة في المستوى x y.

وبالتالي يتم الحصول على ما يلي :-

$$\mathbf{B}(0,0,z)=\frac{\mu I a}{4\pi}\int_{\phi'=0}^{2\pi}\frac{d\phi'\,\mathbf{a}'_{\varphi}\times(z\,\mathbf{a}_z-a\,\mathbf{a}_\rho)}{(z^2+a^2)^{3/2}}=\frac{\mu I a}{4\pi}\int_{0}^{2\pi}\frac{(z\,\mathbf{a}_\rho+a\,\mathbf{a}_z)}{(z^2+a^2)^{3/2}}\,d\phi'$$

وفي

ضوء التماثل فإن $B\rho$ يصبح صفراً ($a\rho$تتغير معتغير ϕ' بحيث إن مجموع عناصر

$B\rho$لكل المدى تؤول إلى الصفر) ويتم استنتاج كثافة الفيض المغناطيسي B كما

يلي :-

$$B_z\ (0,0,z)=\frac{\mu\, I\, a^2}{2\,(z^2+a^2)^{3/2}}\quad Wb/m^2$$

وعند مركز الحلقة فإن قيمة B تصبح

$$B_z\ (0,0,0)=\frac{\mu\, I}{2\,a}\quad Wb/m^2$$

القوة المغناطيسية

تعتبر القوة المغناطيسية (magnetic force) ذات أهمية قصوى في تطبيقات متعددة أهمها الآلات الكهربائية وسيتم هنا معالجة الموضوع بصورة مبسطةٍ. إذا كانت هناك دارة كهربائية (مثلاً على شكل سلك موصل طويل) تحمل تياراً كهربائياً I1 A وتقع هذه الدارة ضمن المجال المغناطيسي لمصدر مغناطيسي مجاور(مثلاً سلك موصل أخر يحمل تياراً كهربائياًً I2 A) فإن القوة المغناطيسية من هذا المصدر على طول صغير dL من الدارة الكهربائية تكون كما يلي :-

$$\mathbf{d\,F} = \mathrm{I}_1\ \mathrm{d}\mathbf{L}_1 \times \mathbf{B}_2 \qquad \mathrm{N} \qquad \textbf{(44-1)}$$

حيث إن dL1يمثل طولاً تفاضلياً من الدارة الكهربائية التي تقع تحت تأثير المجال المغناطيسي الخارجي و B2 هي كثافة الفيض المغناطيسي الناتجة عن المصدر المجاور للدارة الكهربائية. وبالتالي فإن القوة الكلية هي كما يلي:-

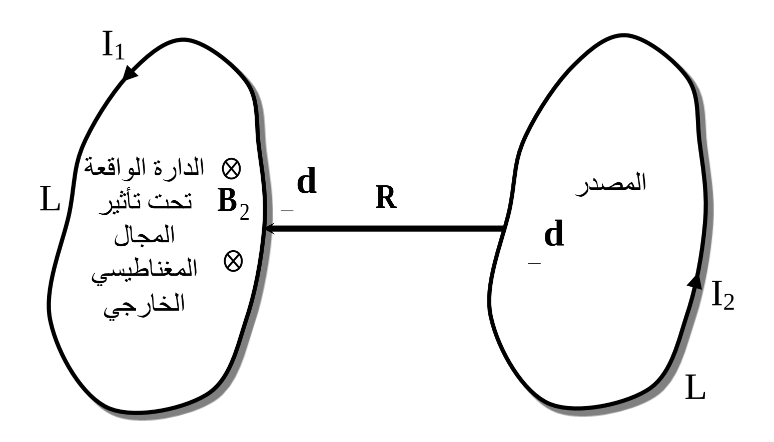
$$\mathbf{F} = \frac{\mu\ \mathrm{I}_1\ \mathrm{I}_2}{4\,\pi}\int_{\mathrm{L}_2}\int_{\mathrm{L}_1}\frac{\mathbf{dL}_1 \times (\mathbf{dL}_2 \times \mathbf{a}_\mathrm{R})}{\mathrm{R}^2}$$

(45-1)

حيث تم استخدام قانون بيوت- سافارت لكتابة B2 علماً بأن R تمثل المسافة بين الطولين التفاضليين dL1 و dL2. إذا كانت الدارة الكهربائية محدودة في أبعادها وكان المصدر المجاور عبارة عن دارة كهربائية محدودة الأطوال، كما هو مبين في الشكل (1-28)، فيمكن استبدال التكاملين على L1 و L2 بتكاملين مقفلين يتم أجراؤهما على L1 و L2 كما يلي :-

$$\mathbf{F} = \frac{\mu\, I_1\, I_2}{4\,\pi} \oint_{L_1} \oint_{L_2} \frac{\mathbf{dL}_1 \times (\mathbf{dL}_2 \times \mathbf{a}_R)}{R^2}$$

(46-1)



الشكل (1-28):- دارتان متجاوتان الأولى يمر بها تيار I1 وتتأثر من الثانية التي يمر فيها تيار I2.

مثال (1-18):- يبين الشكل (1-29) حلقة مستطيلة L1×L2 مكونة من سلك موصل يمر فيها تيار مقداره I A وتقع تحت تأثير كثافة فيض مغناطيسي $\mathbf{B}\ \ \mathrm{Wb/m^2}$. أوجد القوة المؤثرة على هذه الحلقة في الحالتين التاليتين (i):- إذا كانت $\mathbf{B}=B_1\mathbf{a}_z\ \ \mathrm{Wb/m^2}$.

(ii):- إذا كانت $\mathbf{B}=B_2\ \mathbf{a}_y\ \ \mathrm{Wb/m^2}$.

افترض أن الحلقة واقعة في المستوى xy ويقع مركزها عند نقطة الأصل.

الحـــل:-

(i) إذا كانت $\mathbf{B}\ =B_1\ \mathbf{a}_z$ فإن القوة المؤثرة على أضلاع الحلقة هي كما يلي :-

$$\mathbf{F}_{1ab}=I\,L_2\ \ B_1\ \mathbf{a}_x\qquad N\qquad \mathbf{F}_{1bc}=I\,L_1\ \ B_1\ \mathbf{a}_y\qquad N$$

$$\mathbf{F}_{1cd}=-I\,L_2\ \ B_1\ \mathbf{a}_x\qquad N\quad \text{و}\quad \mathbf{F}_{1da}=-I\,L_1\ \ B_1\ \mathbf{a}_y\qquad N$$

وكما يلاحظ فإن القوى المؤثرة على الحلقة تحاول توسعتها .

(ii) إذا كانت $\mathbf{B}=B_2\ \mathbf{a}_y$ فإن القوة المؤثرة على الإضلاع هي كما يلي :-

$$\mathbf{F}_{2ab}=0\qquad N\quad \text{و}\quad \mathbf{F}_{2bc}=-\ I\,L_1\ \ B_2\ \mathbf{a}_z\qquad N$$

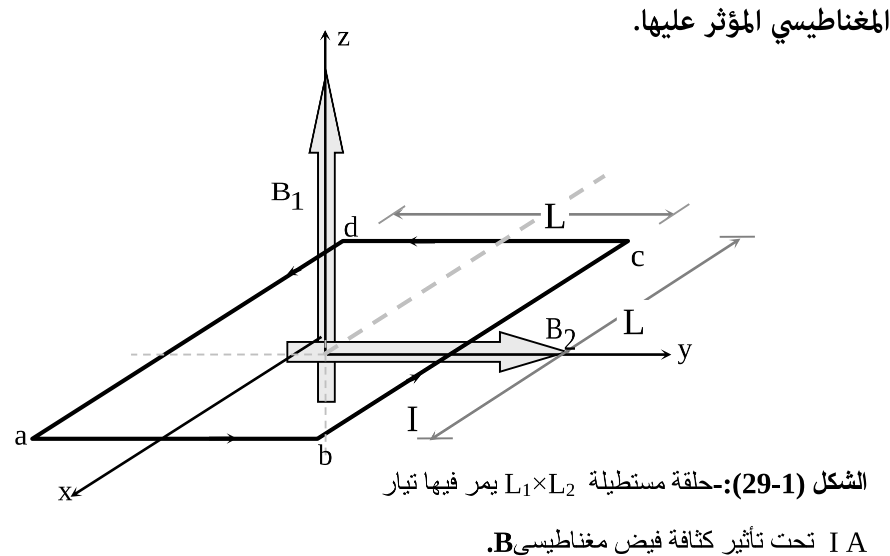
$\mathbf{F}_{2da} = +I\,L_1 \;\; B_2 \;\; \mathbf{a}_z \qquad N$ و $\mathbf{F}_{2cd} = 0 \qquad N$

يلاحظ هنا أن القوى المؤثرة محصورة في الضلع bc و da وإذا كان هناك محور للحلقة باتجاه المحور x فإن للقوى المؤثرة على الحلقة عزم دوران مقداره

$\mathbf{T} = -I\,L_1L_2B_2\mathbf{a}_x \quad Nm$ **، وإذا ما تم تعريف عزم هذه الحلقة**

$\mathbf{m} = I\,L_1L_2\;\mathbf{a}_z$ **فإن عزم الدوران لها يساوي** $\mathbf{T} = \mathbf{m}\times\mathbf{B} \quad Nm$ **ومما سبق**

فإن عزم الدوران للحلقة يتناسب مع مساحتها والتيار المار بها وكثافة الفيض المغناطيسي المؤثر عليها.



الشكل (1-29):- حلقة مستطيلة $L_1\times L_2$ يمر فيها تيار I A تحت تأثير كثافة فيض مغناطيسي**B.**

المجال المغناطيسي وقانون أمبير

تكتب العلاقة (42-1) لتيار خط يسري في سلك بعد أخـذ طول تفاضلي dL' كما يلي:-

$$\mathbf{dB} = \mu \frac{I \ d\mathbf{L}' \times \mathbf{a}_R}{4\pi R^2} \quad Wb/m^2$$

فإذا تم استثناء ثابت الوسط المغناطيسي μ فإن للكمية $\frac{I \, \mathbf{dL}' \times \mathbf{a}_R}{4\pi R^2}$ **وحدات كثافة التيار السطحية (A / m) ولا تعتمد على خصائص الوسط المغناطيسية وسيتم تعريفها على أنها تمثل شدة المجال المغناطيسي (magnetic field intensity) أو ببساطة المجال المغناطيسي dH وبشكل عام فإن هذا المجال المغناطيسي Hيرتبط مع كثافة الفيض المغناطيسي Bكما يلي:-**

$$\mathbf{B} = \mu \ \mathbf{H} \qquad \textbf{(47a-1)}$$

علماً بأنه يمكن التعبير عن المجال المغناطيسي H كما يلي :-

$$\mathbf{H} = \frac{1}{4\pi} \iiint_{V'} \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \mathbf{a}_R}{R^2} \ dV' \qquad \textbf{(47b-1)}$$

ويكون هذا المجال المغناطيسي عند النقطة $(r, \phi, 0)$ لسلك موصل طويل موضوع على محور z يحمل تياراً I A ، أنظر المثال (1-16) ، كما يلي:-

$$H_\phi = \frac{I}{2\pi\rho}$$

فإذا تم أخذ طول تفاضلي على الدارة التي تمثل H أو $d\mathbf{L} = \rho\, d\phi\, \mathbf{a}_\phi$ فإن

$$\oint_L \mathbf{H} \bullet d\mathbf{L} = \oint_\phi \frac{I}{2\pi\rho}\rho\, d\phi = \int_{\phi=0}^{2\pi} \frac{I}{2\pi}\, d\phi = I$$

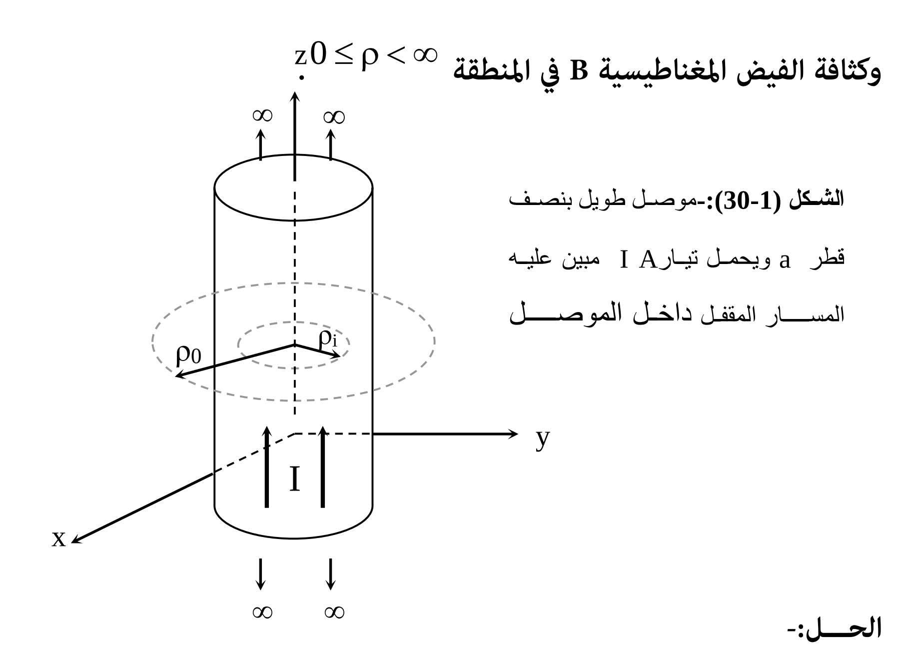
ويمكن إعادة العلاقة الأخيرة كما يلي :-

$$\oint_L \mathbf{H} \bullet d\mathbf{L} = I = \iint_S \mathbf{J} \bullet d\mathbf{S} \qquad (1\text{-}48)$$

وتمثل العلاقة الأخيرة قانون أمبير (Amper's Law) الذي يربط المصدر I (أو J) بالناتج H وهو يناظر قانون جاوس في المجالات الكهربائية الثابتة في الزمن. ويتم استخدام هذا القانون لإيجاد المجالات المغناطيسية إذا توافرت شروط التماثل وعدم تغير المجال المغناطيسي أثناء إجراء التكامل على المسار المقفل L.

مثال (1-19):- يبين الشكل (1-30) موصلاً طويلاً نصف قطره a ويحمل تيار خط I A موضوع ومحوره منطبق على المحور z. أوجد المجال المغناطيسي H

وكثافة الفيض المغناطيسية B في المنطقة $0 \le \rho < \infty$



الشكل (1-30):-موصل طويل بنصف قطر a ويحمل تيار A I مبين عليه المسار المقفل داخل الموصل

الحـــل:-

نظراً للتماثل في هذه المسألة فإن H سوف لن يتغير مع ϕ **أو z وبما أن المسار الذي سيتم إجراء التكامل عليه (باستخدام قانون أمبير) هو باتجاه** $\mathbf{a}_\phi$ **فإن تطبيق العلاقة (1-48) على المسار الذي يكون نصف قطره** $0 \le \rho_i \le a$ **يعطي ما يلي:-**

$$H_\phi \, 2\pi\rho_i = \frac{I}{\pi a^2}\pi\rho_i^2 \quad \Rightarrow\Rightarrow \quad H_\phi = \frac{I\rho_i}{2\pi a^2} \quad A/m$$

ويكون Bكما يلي

$$B_\phi = \mu I \rho_i /(2 \pi a^2) \qquad Wb/m^2$$

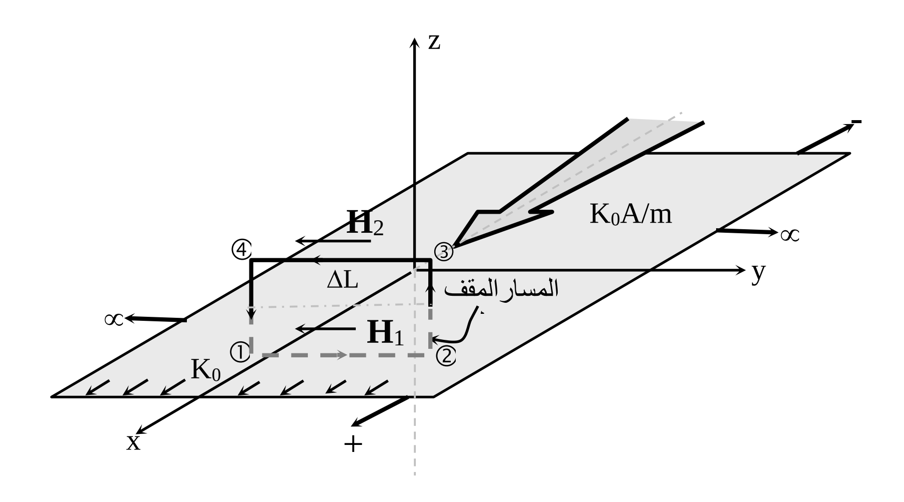
أما في المنطقة $\rho > a$ **فإن المسار الذي يكون نصف قطره** $\rho_0 \geq a$ **قد تم اختياره و يتم الحصول على ما يلي :-**

$$H_\phi \, 2 \pi \rho_0 = I \Rightarrow\Rightarrow H_\phi = I/(2 \pi \rho_0) \qquad A/m$$

ويكون B كما يلي :

$$B_\phi = \mu I/(2 \pi \rho_0) \qquad Wb/m^2$$

مثال:- (1-20) يبين الشكل (1-31) صفيحة معدنية رقيقة موضوعة في المستوى xy وتمتد في اتجاه x و y إلى ما لانهاية. إذا كانت كثافة التيار الخطي في هذه الصفيحة $\mathbf{K} = K_0 \, \mathbf{a}_x \quad A/m$ **فأوجد المجال المغناطيسي H وكثافة الفيض المغناطيسي فوق وتحت الصفيحة مباشرة.**



الشكل :- (31-1) صفيحة معدنية رقيقة موضوعة في المستوى xy، عند z = 0،

وتحمل تياراً خطياً كثافته $\mathbf{K} = K_0\ \mathbf{a}_x \quad A/m$.

الحـــل:-

من التماثل في هذا المثال فإن H لا تتغير مع x أو مع y وبالتالي إذا ما أخذنا المسار المقفل المبين على الشكل (31-1) وهو عبارة عن مستطيل طول ضلعه الموازي لمحور y هو ΔL، فإن قانون أمبير يعطي ما يلي :-

$$\oint_L \mathbf{H} \bullet d\mathbf{L} = \left[\int_1^2 + \int_2^3 + \int_3^4 + \int_4^1 \right] \mathbf{H} \bullet d\mathbf{L} = K_0 \ \Delta L$$

وبما أنه لن يكون هناك عناصر للمجال المغناطيسي في اتجاه az فإن كلا من التكامل الثاني والأخير يؤولان إلى الصفر ويلاحظ كذلك أن |H2| = |H1|، أو

$$\int_{-\Delta L/2}^{\Delta L/2} H_{y1} \ \mathbf{a}_y \bullet d_y \ \mathbf{a}_y + \int_{\Delta L/2}^{-\Delta L/2} - H_{y2} \ \mathbf{a}_y \bullet d_y \ \mathbf{a}_y = K_0 \ \Delta L$$

أو أن $H_{y1} = H_{y2} = K_0 / 2 \quad A/m$

وبالتالي فإن $B_{y1} = B_{y2} = \mu \ K_0 / 2 \quad Wb/m^2$

الالتفاف ونظرية ستوك The Curl & Stock's Theory

تبين العلاقة (1-48) ارتباط المجال المغناطيسي Hمع المصدر Jعبر إيجاد حصيلة الأول على مسار مقفل Lوإيجاد الثاني المار في مساحة مفتوحةSمحددة بالمسار المقفل L.

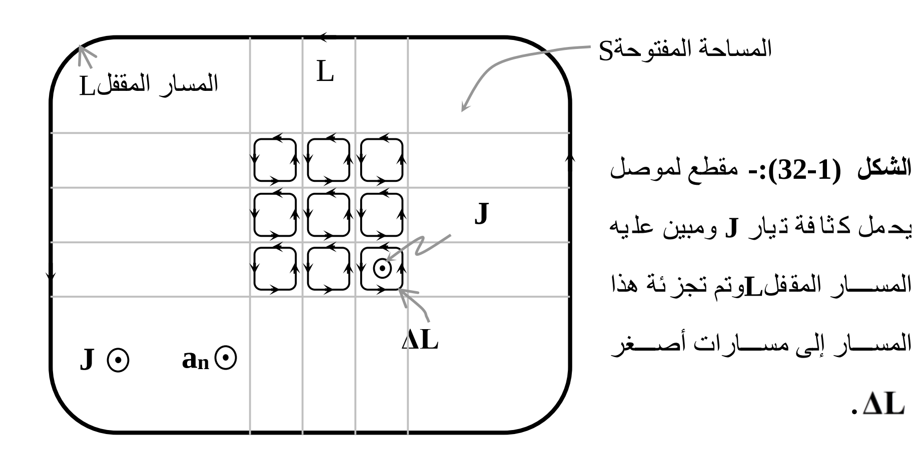
وإذا ما آل المسار المقفل L إلى ΔL وبالتالي إلى الصفر فإنSتؤول إلى ΔS وبالتالي إلى الصفر وفي ضوء ذلك يمكن كتابة المعادلة (1-48) كما يلي:-

$$\oint_{\Delta L} \mathbf{H} \bullet d\mathbf{L} \approx \mathbf{J} \bullet \Delta\mathbf{S}$$

أو

$$\mathbf{J}\,.\mathbf{a_n} = \lim_{\substack{\Delta L \to 0 \\ \Delta S \to 0}} \frac{\oint_{\Delta L} \mathbf{H} \bullet d\mathbf{L}}{\Delta S} \equiv (\nabla \times \mathbf{H}).\mathbf{a_n} \qquad \textbf{(49-1)}$$

حيث إن $\mathbf{a_n}$ هو متجه وحدة طول ويكون عمودياً على $\Delta\mathbf{S}$ ، وتمثل المعادلة (49-1) علاقة كثافة التيار السطحي J مع المجال المغناطيسي عبر علاقة الالتفاف. يبين الشكل (32-1) مقطعاً في موصل أو في وسط يحمل تياراً مقداره $I\,A$ $(\mathbf{J}\ A/m^2)$ تم تجزئته إلى مسارات مقفلة صغيرة ويعطي تطبيق قانون أمبير على أي جزء من هذه الأجزاء عندما يؤول طول المسار إلى الصفرالعلاقة (49-1) المبينة أعلاه. يلاحظ أن أجزاء المسارات المتلاصقة تكون باتجاهات متعاكسة وبالتالي فإنها تلغي بعضها البعض عند إيجاد محصلتها.



الشكل (1-32):- مقطع لموصل يحمل كثافة تيار **J** ومبين عليه المســـار المقفل**L**وتم تجزئة هذا المســـار إلى مســـارات أصـــغر **ΔL**.

في ضوء المعادلة (1-49) يمكن أن يتم إعادة كتابة قانون أمبير كما يلي :-

$$\oint_{L} \mathbf{H} \bullet d\mathbf{L} = \iint_{S} \mathbf{J} \bullet d\mathbf{S} = \iint_{S} \nabla \times \mathbf{H} \bullet d\mathbf{S} \qquad \textbf{(50-1)}$$

وتمثل العلاقة الأخيرة نظرية ستوك والتي تحول التكامل على مسار مقفل إلى تكامل على مساحة مفتوحة لنفس الكمية (المتجه) وهي في هذه الحالة المجال المغناطيسي H.

لقد أصبح واضحاً حتى الآن أن التيار المستمر بحاجة إلى مسار مقفل أو أن الشحنات تبدأ حركتها مثلاً من نقطة معينة وينتهي بها المطاف إلى نفس النقطة. كذلك فإن المجالات المغناطيسية بشكل عام هي خطوط مقفلة بحيث إن الخط الممثل للمجال المغناطيسي H أو لكثافة الفيض المغناطيسي B ليس له بداية أو نهاية. وفي ضوء ذلك فإنه إذا ما تم تطبيق قانون جاوس على التيار نحصل على قانون كيرشوف للتيار وكذلك إذا تم تطبيق قانون جاوس على المجالات المغناطيسية فإن الناتج يصبح صفراً وكذلك الحال بالنسبة للتشتت أو

$$\oiint_S \mathbf{B} \bullet \mathbf{dS} = \Psi_m = 0 \qquad \textbf{(51a-1)}$$

$$\nabla \bullet \mathbf{B} = 0 \qquad \textbf{(51b-1)}$$

حيث إن Ψ_m هي كمية الفيض المغناطيسية الكلية التي تخرج من سطح مقفل (وتساوي صفراً). وهذا يعني غياب الشحنات المغناطيسية أو عدم وجود مثل هذه الشحنات فيزيائياً . وسيتم معالجة هذا الأمر مرة أخرى عند النظر في أمر المواد المغناطيسية وخصائصها.

الجهد الاتجاهي المغناطيسي Magnetic Vector Potential

تم في الفصول السابقة الحصول على المجالات المغناطيسية الناتجة عن مصدر مغناطيسي باستخدام قانون بيوت -سافارت عبر عملية تكاملية. أما هنا فإنه سيتم الحصول على المجال المغناطيسي الناتج من مصدر مغناطيسي عبر عمليتين الأولى من خلال إجراء عملية تكاملية للتيار للحصول على ما يعرف بالجهد الاتجاهي المغناطيسي A والثانية تفاضلية حيث تتم مفاضلة هذا الجهد الاتجاهي المغناطيسي عبر علاقة الالتفاف للحصول على كثافة الفيض المغناطيسي B كما يلي:-

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}) = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{V'} \frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}')}{R}\, dV' \qquad \textbf{(52a-1)}$$

$$\mathbf{B}(\mathbf{r}) = \nabla \times \mathbf{A}(\mathbf{r}) \qquad \textbf{(52b-1)}$$

ويلاحظ أن اتجاه A يحدد مباشرة من اتجاه J إضافة إلى أن التكامل المبين في المعادلة (52a-1) ابسط بكثير من ذلك المعطى في المعادلة (43-1). ولإثبات أن نتيجة المعادلة (52-1) تؤدي إلى المعادلة (43-1) يتم التعويض بالمعادلة (52a-1) في (52 b-1) أو

$$\mathbf{B} = \frac{\mu}{4\pi} \nabla \times \iiint_{V'} \frac{\mathbf{J}\,(\mathbf{r}')\, dV'}{R}$$

وحيث إن ∇ تعمل على **r** وليس على $\mathbf{r}'$ (علىx و y و zوليس على x' و y' و z') فإنه يمكن إدخالها داخل التكامل أو أن

$$\mathbf{B} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{V'} \nabla \times \left(\frac{\mathbf{J}\,(\mathbf{r}')}{R} \right) dV'$$

(53-1)

ومن الملحق IIIالعلاقة (21h-III) يتم كتابة الكمية $\nabla \times (\mathbf{J}(\mathbf{r}')/R)$ كما يلي :-

$$\nabla \times \left(\frac{\mathbf{J}\,(\mathbf{r}')}{R} \right) = \frac{1}{R}\, \nabla \times \left(\mathbf{J}\,(\mathbf{r}') \right) + \nabla \left(\frac{1}{R} \right) \times \mathbf{J}$$

ولكن $\nabla \times \left(\mathbf{J}\,(\mathbf{r}') \right) = 0$ لان التفاضل هنا يكون بالنسبة للمتغير **r** وليس $\mathbf{r}'$

وكـذلك فـإن $\nabla (1/R) = -\mathbf{a}_R / R^2$ أو أن المعادلة (53-1) تصبح كما يلي:-

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = -\frac{\mu}{4\pi} \iiint_{V'} \frac{\mathbf{a}_R}{R^2} \times \mathbf{J}\,(\mathbf{r}')\, dV'$$

أو

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi} \iiint_{V'} \left(\frac{\mathbf{J}(\mathbf{r}') \times \mathbf{a}_R}{R^2} \right) dV' \qquad \textbf{(54-1)}$$

وهي نفس المعادلة (1-43).

مثال (1-21):-يبين الشكـل (1-33) سلكاً موصلاً صغيراً بطول L يحمل تياراً مستمراً I A (يمكن اعتماد هذا المثال من الناحية النظرية أو الرياضية فقط وسيتم توضيح إمكانية وجوده في الواقع في الباب السابع) والسلك موضوع بشكل متماثل على المحور z (هذا ما يدعى بثنائي القطب الكهربائي). أوجد الجهد الاتجاهي المغناطيسي A وكثافة الفيض المغناطيسي عند النقطة $P(r, \theta, \phi)$ علماً بأن r>> L.

الحـــل:-

يتم إيجاد A من العلاقة (1-52a) إلا أنه يتم في هذه الحالة استبدال $\mathbf{J}(\mathbf{r}')dV'$ بالكمية $I\,\mathbf{dL}' = I\,dz'\,\mathbf{a}_z$، أو

$$A_z = \frac{\mu I}{4\pi} \int_{-L/2}^{L/2} \frac{dz'}{R}$$

علماً بأن $R = \sqrt{r^2 + z'^2 - 2rz' \cos\theta}$ **وبما أن L >> r فإنه يمكن تقريب R أو**

R ~ r وبالتالي فإن Az تصبح

$$A_z = \frac{\mu I L}{4\pi r} \quad Wb/m$$

أو $\mathbf{A} = A_z \cos\theta\, \mathbf{a}_r - A_z \sin\theta\, \mathbf{a}_\theta$

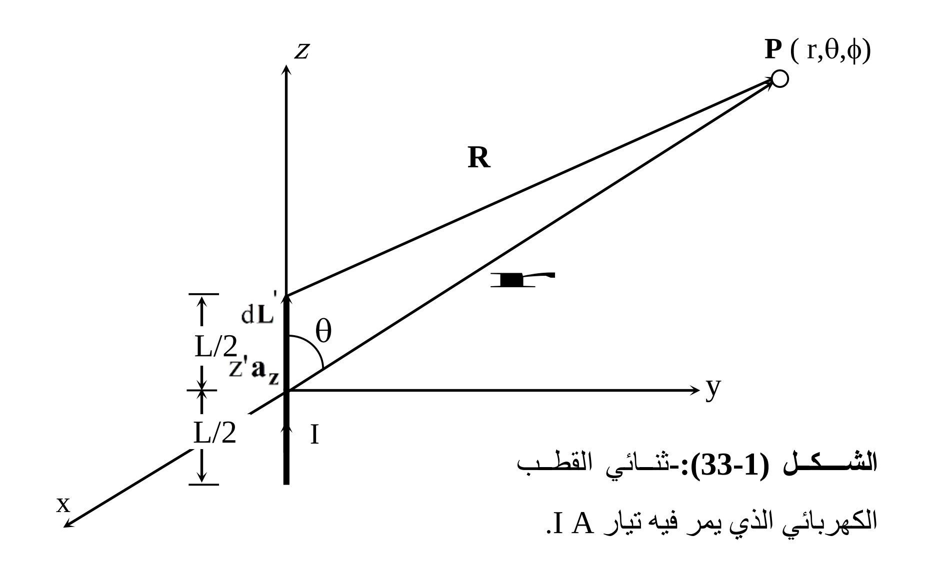
أو

$$\mathbf{A} = \frac{\mu I L}{4\pi r} (\cos\theta\, \mathbf{a}_r - \sin\theta\, \mathbf{a}_\theta)$$

ومن الملحق III العلاقة (19c-III) يتم إيجاد $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$،

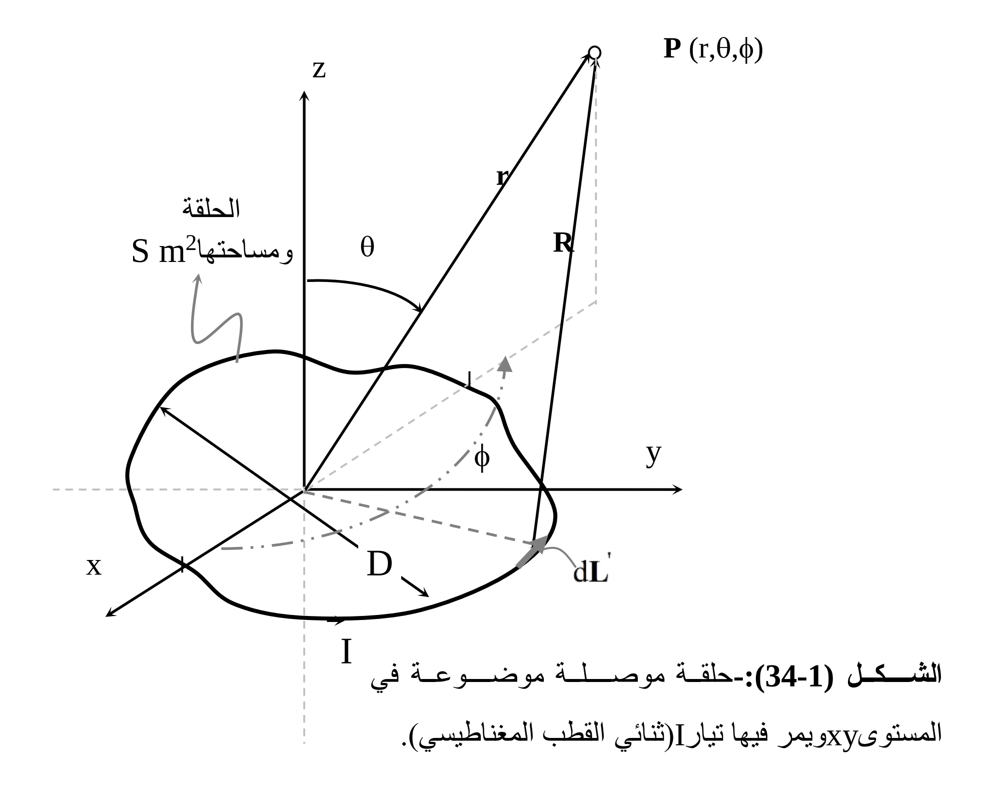
أو

$$\mathbf{B} = \mathbf{a}_\phi \frac{1}{r} \frac{\partial Ar}{\partial \theta} = \frac{\mu I L}{4\pi r^2} \sin\theta\, \mathbf{a}_\phi \; Wb/m^2$$



الشـــكـل (1-33):-ثنـائي القطـب الكهربائي الذي يمر فيه تيار I A.

مثال (1-22):- يبين الشكل (1-34) حلقة موصلة (يمكن أن تكون دائرية أو قطع ناقص أو مربعة أو مستطيلة أو أي شكل أخر) ومساحتها S m2 ويمر فيها التيار I Aوموضوعة في المستوى xy. أوجد الجهد الاتجاهي المغناطيسي Aوكثافة الفيض المغناطيسي B عند النقطة $P\ (r, \theta, \phi)$ **علماً بأن D >> r حيث إن D يمثل أكبر أتساع لهذه الحلقة (يطلق على هذه الحلقة أسم ثنائي القطب المغناطيسي).**



الشـــكـل (34-1):-حلقـة موصـــلـة موضـــوعـة في المستوىxyويمر فيها تيارI(ثنائي القطب المغناطيسي).

الحـــل:-

يمكن إيجاد الجهد الاتجاهي المغناطيسي A من العلاقة (52a-1) علماً بأن

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\pi}\oint_{L'} \frac{I\,\mathbf{dL}'}{R}$$

$\mathbf{J}\,dV' = I\,\mathbf{dL}'$ **أو**

تم كتابة التكامل على المسار المقفل (الذي يمثل السلك الحامل للتيار) في المعادلة أعلاه. بالرجوع إلى الملحق IIIالعلاقة (22e-III) يمكن أن يعاد كتابة العلاقة الأخيرة كما يلي:-

$$\mathbf{A} = \frac{\mu\, I}{4\,\pi} \iint_S \mathbf{a}_n \times \nabla' \left(\frac{1}{R}\right) dS$$

حيث إن $\mathbf{a}_n$ (أو $\mathbf{a}_z$) يمثل العمودي على مستوى الحلقة، و

$$\nabla' = \frac{\partial}{\partial x'}\mathbf{a}_x + \frac{\partial}{\partial y'}\mathbf{a}_y + \frac{\partial}{\partial z'}\mathbf{a}_z$$

؛علماً بان النقطة (x', y', z') تمثل نقطة على المصدر وبالتالي فإن $\nabla'\left(\frac{1}{R}\right) = \frac{\mathbf{R}}{R^3} = \frac{\mathbf{a}_R}{R^2}$. وإذا كانت $r >> D$ فإن $R \sim r$ و $aR \sim ar$ وبالتالي فـإن الجهـد الاتجاهي المغناطيسي A يصبح كما يلي :-

$$\mathbf{A} = \frac{\mu\, I\, S}{4\,\pi\, r^2}\, \mathbf{a}_z \times \mathbf{a}_r = \frac{\mu\, I\, S}{4\,\pi\, r^2}\ \sin\theta\ \ \mathbf{a}_\phi$$

وإذا تم تعريف الكمية IS بأنها العزم المغناطيسي m_m لهذه الحلقة (التي تمثل ثنائي القطب المغناطيسي) أو أن $\mathbf{m}_m = I\mathbf{S}\ Am^2$ (في هـذه الحالة $\mathbf{m}_m = I\,S\ \ \mathbf{a}_z$) وبالتالي يمكن إعادة كتابة A كما يلي :-

$$\mathbf{A} = \frac{\mu}{4\,\pi\, r^2}\ \ \mathbf{m}_m \times \mathbf{a}_r$$

أما كثافة الفيض المغناطيسي B فيتم إيجادها من $\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}$ أو

$$\mathbf{B} = \frac{1}{r\sin\theta}\,\frac{\partial}{\partial\theta}\ (A_\phi\ \sin\theta)\,\mathbf{a}_r - \frac{1}{r}\,\frac{\partial}{\partial\, r}(A_\phi\ r)\,\mathbf{a}_\theta$$

أو أن

$$\mathbf{B} = \frac{\mu I\, S}{4\,\pi\, r^3}\ \left[2\cos\theta\,\mathbf{a}_r + \sin\theta\,\mathbf{a}_\theta\right]\ \ \mathrm{Wb/m^2}$$

إذا كان عدد لفات الحلقة N لفة فإنه يتم ضرب الكميات السالفة الذكر بالعدد N لإيجاد القيمة الكلية.

سبق وتم تقديم العلاقتين التاليتين :

$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J}$ و $\nabla \times \mathbf{A} = \mathbf{B} = \mu\, \mathbf{H}$ ويمكن إعادة كتابتهما كما يلي:-

$$\nabla \times (\nabla \times \mathbf{A}) = \nabla \times \mathbf{B} = \nabla \times (\mu\, \mathbf{H}) = \mu\, \mathbf{J}$$

وإذا كان الوسط متجانساً وأحادي الخصائص (أي أن μ لا تتغير مع المسافة) فإنه وباستخدام العلاقة(21L-III) من الملحق III يتم استنتاج العلاقة التالية

$$\nabla (\nabla \bullet \mathbf{A}) - \nabla^2\, \mathbf{A} = \mu\, \mathbf{J} \qquad \textbf{(55a-1)}$$

وحيث أن A تتناسب مع التيار فيمكن اختيار $\nabla \bullet \mathbf{A} = 0$ ، أي أن

$$\nabla^2 \mathbf{A} = -\mu\, \mathbf{J} \qquad \textbf{(55b-1)}$$

وهي علاقة تفاضلية تربط A مع J وتستخدم في حل مسائل الهوائيات.

المواد المغناطيسية Magnetic Materials

تتكون المواد عامة من ذرات وتتكون الذرة من نواة تحوي شحنات موجبة وأجسام أخرى غير مشحونة. ويدور حول هذه الذرة شحنات سالبة (إلكترونات) في مدارات وتقوم كذلك أثناء دورانها بالغزل (spinning) أو الالتفاف حول نفسها تماماً كما يحدث في حركة الأرض حول الشمس وكذلك حول نفسها في آن واحد. ويمكن التعبير عن مجمل حركة هذه الشحنات، لذرة واحدة مثلاً أو مجموعة من الذرات،

باستخدام حلقة من لفة واحدة أو عدد من اللفات مساحتها m2S ويمر فيها تيار I A وعزمها المغناطيسي $\mathbf{m}_m = I\,\mathbf{S}\ \mathrm{Am}^2$ (أو ثنائي القطب المغناطيسي). ويتم تحديد هذا العزم المغناطيسي من قياس ومشاهدة المجالات المغناطيسية الناتجة عن حركة شحنات الذرة أو مجموعة الذرات ومساواتها بتلك الناتجة عن الحلقة. ويمكن النظر إلى ثنائي القطب المغناطيسي على أنه مغناطيس صغير ذي قطبين أحدهما القطب الشمالي (N) والأخر القطب الجنوبي (S) أو على أنه مكون من شحنتين مغناطيسيتينqm- و qm (هذه كميات رياضية وليست فيزيائية) ووحداتها Wb تفصل بينهما مسافة L وبالتالي فإن عزم هذا المغناطيس المناظر هو qmL. ويمكن النظر لهذا الثنائي على انه مناظر لثنائي القطب الكهربائي الذي ورد في المثال (1-21) ولكن الحديث هنا عن تيار مغناطيسي Im (هذا تيار رياضي وغير موجودٍ فيزيائياً) في سلك طوله L بحيث يكون عزمه مساوياً Im L وفي جميع الحالات السابقة فإن

$$I\,S \equiv I_m L \equiv q_m L \qquad (56\text{-}1)$$

ويبين الشكل (1-35) الوضع الفعلي لذرة بها مجموعة من الشحنات والتي تتحرك وتغزل في نفس الوقت وما يناظرها من حلقة (من مجموعة من اللفات)أو مغناطيس صغير أو ثنائي قطب مغناطيسي بتيار Im. وتتأثر ثنائيات القطب لمادة ما بقوى التجاذب والتنافر فيما بينهما داخلياً إضافة إلى القوى العشوائية التي تكتسبها من الطاقة الحرارية لمحيطها الخارجي.

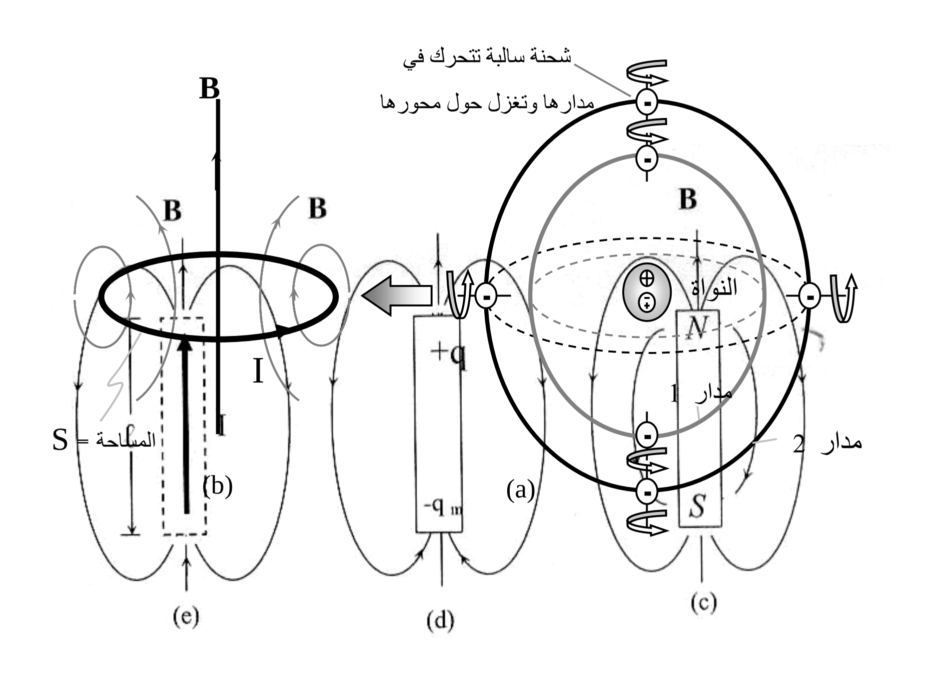
يصطف كل ثنائي باتجاه قد يختلف عن اتجاه الثنائي الآخر بحيث أن مجمل الأثر الخارجي لهذه الثنائيات يصبح صفراً وهذا ناتج عن الاصطفاف العشوائي لهذه الثنائيات. إذا ما تم التأثير على هذه المادة بمجال مغناطيسي خارجي فإن هذا المجال يحاول تنظيم اصطفاف هذه الثنائيات باتجاهه، وإذا ما نجح في ذلك فينتج عن ذلك مجال مغناطيسي داخلي إضافة للمجال الخارجي. ويعتمد ذلك على خاصية المادة حيث إن هناك مواداً تكون فيها هذه القوى الداخلية والعشوائية الخارجية أكبر بكثير من المجالات المغناطيسية الخارجية التي تحاول تنظيم اصطفافها

وبالتالي فإن مجمل المجالات المغناطيسية الداخلية والكلية الناتجة عن هذه الثنائيات تبقى مساوية للصفر وتدعى هذه المواد بأنها مواد غير مغناطيسية ويكون ثابت الوسط لها أو نفاذيتها هو $\mu_0 = 4\pi\times10^{-7}\ \mathrm{H/m}$ **ويرتبط المجال المغناطيسي H بكثافة الفيض المغناطيسي B داخلها كما يلي :-**

$$\mathbf{B} = \mu_0\ \mathbf{H} \qquad \mathrm{Wb/m^2} \qquad \textbf{(57-1)}$$

أما إذا اصطفت هذه الثنائيات نتيجة تأثرها بمجال مغناطيسي خارجي لمواد أخرى فإنه وفي حجم مقداره ΔV **مثلاً يمكن وجود N من هذه الثنائيات والتي يكون مجمل عزومها هو** $N\,\mathbf{m}_m\ \ \mathrm{Am^2}$ **، وعليه فإن كثافة هذه الثنائيات تصبح** $N\,\mathbf{m}_m/\Delta V \quad \mathrm{A/m}$ **ويلاحظ أن وحداتها تشابه وحدات المجال المغناطيسي H أو وحدات كثافة التيار الخطي وتدعى هذه الكمية بأنها متجه المغنطة (magnetization vector) أو متجـه الاستقطـاب المغناطيسي (magnetic polarization)M أو**

$$\mathbf{M} = \mathrm{N}\,\mathbf{m}_{\mathrm{m}} / \Delta \mathrm{V} \quad \mathrm{A/m} \qquad (58\text{-}1)$$



الشكل (1-35):-حركة الشحنات داخل الذرة ومكافئاتها (a) الشحنات السالبة المتحركة في مداراتها والتي تغزل حول محورها (b) حلقة مناظرة تحمل تياراً I A ومساحتها S(c) مغناطيس صغير (d) ثنائي قطب مكون من شحنتين مغناطيسيتين (e) تيار مغناطيسي يمر في سلك صغير.

تسم ى مثل هذه المواد بأنها مواد مغناطيسية استقطبت نتيجة تأثرها بمجال مغناطيسي خارجي ويكون المجال المغناطيسي الكلي داخلها هو مجموع الداخلي والخارجي أو $\mathbf{H}+\mathbf{M}\ \ \mathrm{A/m}$ وتكون كثافة الفيض المغناطيسي B داخل مثل هذه المواد كما يلي :-

$$\mathbf{B}=\mu_0\,(\mathbf{H}+\mathbf{M})\equiv\mu\ \mathbf{H} \qquad \textbf{(59a-1)}$$

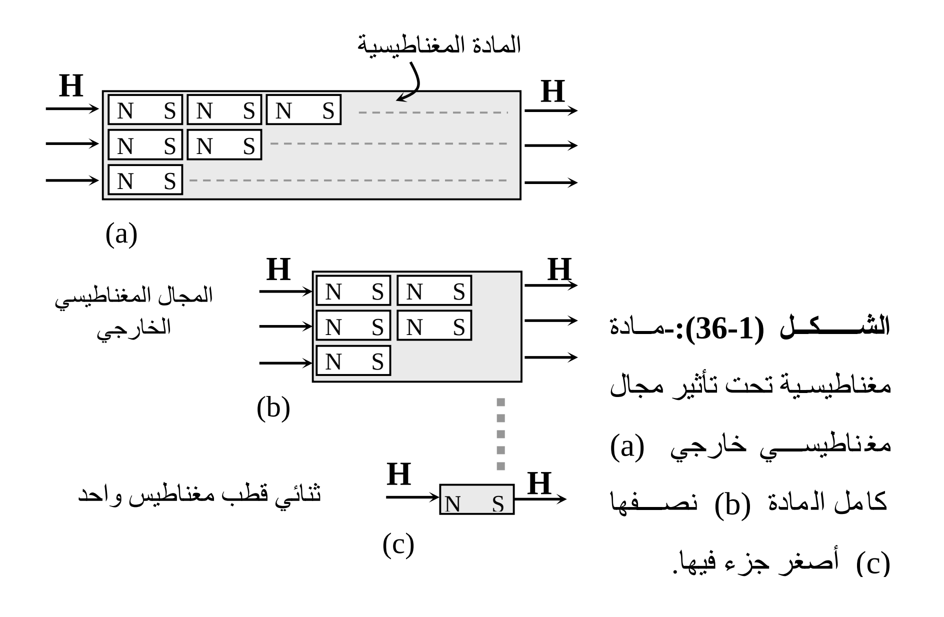
حيث إن μ هو ثابت الوسط المغناطيسي أو نفاذية الوسط وتعطى قيمته بما يلي:-

$$\mu=\mu_r\ \mu_0=\mu_0\,(1+\mathbf{M/H})\quad \mathrm{H/m} \qquad \textbf{(59b-1)}$$

ويمكن النظر إلى μ على أنه يمثل مقدرة الوسط على الاستقطاب المغناطيسي وتعرف الكمية μ_r على أنها قيمة النفاذية النسبية للمواد وتكون قيمتها للمواد المغناطيسية اكبر من الواحد الصحيح وقد تصل إلى بضعة آلاف وهناك ثلاث مواد لها خاصية المغنطة وهي الحديد والكوبالت والنيكل أو أي خليط به هذه المواد. ويبين الشكل (36-1)مادة مغناطيسية على شكل قضيب تم وضعه تحت تأثير مجال مغناطيسي خارجي وقد تم توضيح الاستقطاب المغناطيسي عليه وذلك على شكل عدد من ثنائيات القطب المغناطيسية (مغناطيسيات صغيرة).

ويلاحظ أنه إذا ما تم قطعه إلى نصفين فإن كل نصف سيحوي على نصف هذه الثنائيات. وإذا ما استمرت عملية القطع هذه حتى الوصول إلى ثنائي واحد فإننا نحصل في كل مرة على قطب شمالي يرافقه دائماً قطب جنوبي ولا يمكن الحصول على أقل من ذلك (إلا نظرياً) إذا تم تجميد الشحنات وعدم السماح لها بالتحرك أو الغزل وفي هذه الحالة فإن مجالها المغناطيسي سيتلاشى تبعاً لغياب حركة الشحنات (غياب التيار). أي أن القطب الشمالي والقطب الجنوبي ينتجان معاً ومن غير الممكن الحصول على قطب واحد معزول وبالتالي فإن هذا يعني غياب الشحنات المغناطيسية أو أن

$$\nabla \bullet \mathbf{B} = 0 \Rightarrow \oint\!\!\oint_S \mathbf{B} \bullet \mathbf{dS} = 0 \qquad \textbf{(60-1)}$$



الشـــكـل (36-1):-مـادة مغناطيسـية تحت تأثير مجال مغناطيســـي خارجي (a) كامل المادة (b) نصـــفها (c) أصغر جزء فيها.

ويمكن تقسيم المواد المغناطيسية بشكل عام ولغرض هذا الكتاب إلى مواد مغناطيسية حديدية والفرايت (Ferromagnetic and Ferrite) وكلا المادتين لهما نفاذية نسبية $\mu_r >> 1$ قد تصل إلى بضعة آلاف إلا أن موصلية المادة الأولى عالية وقد تصل إلى $10^6\ (\Omega m)^{-1}$ أما موصلية المادة الثانية فهي متدنية وقد تصل إلى $10^{-6}\ (\Omega m)^{-1}$.

شروط الحدود Boundary Conditions

إذا كان هناك وسطان وخصائصهما كما هو مبين على الشكل (1-37) وكان المجال المغناطيسي وكثافة الفيض المغناطيسي في الوسط الأول H1 و B1 وفي الوسط الثاني H2 وB2 والمطلوب هو ربط هذه المجالات مع بعضها ومن خلال خصائص الوسطين. سيتم تصنيف هذه المجالات، كما ورد في حالة المجالات الكهربائية، إلى عمودي على السطح الفاصل بين الوسطين ومماس لهذا السطح. ويتم

$$\oiint_S \mathbf{B} \bullet \mathbf{dS} = 0$$

ربط Bn1وBn2عبر استخدام العلاقة ويستخدم سطح الأسطوانة المقفل لهذه الغاية ويتم ربطHt1و Ht2 عبر استخدام مسار مقفل، وتم بيان ذلك على الشكل (1-37).

كثافة الفيض المغناطيسي العمودي :-Bn باعتماد اسطوانة مساحة قاعدتيها $\Delta S_{1,2}$ وارتفاعها Δh وبالتالي فإن

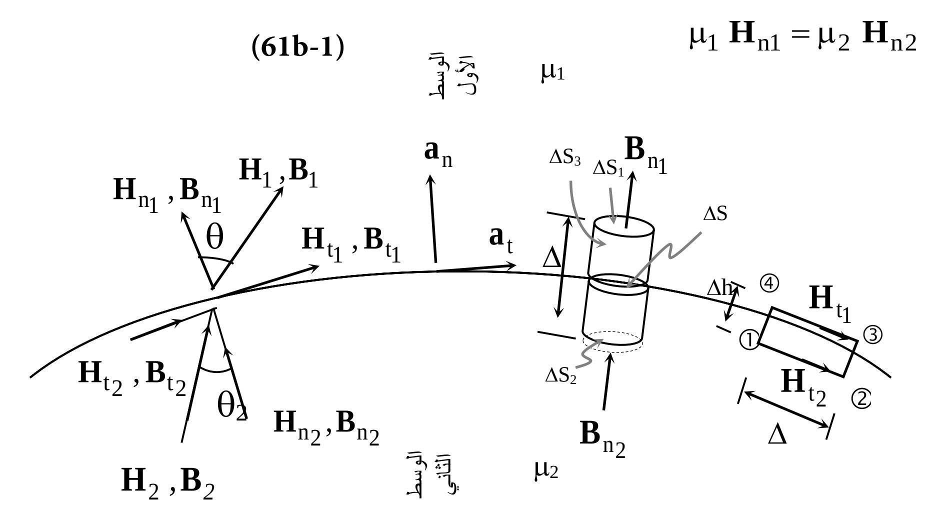
$$\oiint_S \mathbf{B} \bullet \mathbf{dS} = \left[\iint_{S_1} + \iint_{S_2} + \iint_{\Delta S_3} \right] (\mathbf{B} \bullet \mathbf{dS}) = 0$$

وإذا آلت $\Delta h \to 0$ فإن $\Delta S_3 \to 0$ وعندما تؤول كل من $\Delta S_{1,2} \to 0$ فإن ناتج

العلاقة الأخيرة هو (61a-1) $\mathbf{B}_{n1} = \mathbf{B}_{n2}$

أي أن كثافة الفيض المغناطيسي العمودية مستمرة وذلك نظراً لغياب الشحنات المغناطيسية، وهذه العلاقة تناظر العلاقة الواردة في المعادلة (1-28)، وبالتالي فإن

$$\mu_1 \mathbf{H}_{n1} = \mu_2 \mathbf{H}_{n2} \qquad (61b\text{-}1)$$



الشكل (1-37):-المجالات المغناطيسية H و B في وسطين الأول ونفاذيته μ_1 والثاني ونفاذيته μ_2 .

المجالات المغناطيسية الماسة للسطح :-Ht يتم تنفيذ قانون أمبير على المستطيل المبين في الشكل (1-37) ، على1-2-3-4، أو أن

$$\oint_L (\mathbf{H} \bullet \mathbf{dL}) = \left[\int_1^2 + \int_2^3 + \int_3^4 + \int_4^1 \right] (\mathbf{H} \bullet \mathbf{dL}) = \iint_S \mathbf{J} \bullet \mathbf{dS}$$

وإذا آلت Δh إلى الصفر فإن التكامل الثاني والرابع يؤولان إلى الصفر إضافة إلى أن الطرف الأيمن من المعادلة الأخيرة سيؤول إلى الصفر إلا إذا كان هناك تيار خطي K على السطح الفاصل بين الوسطين (هذا في واقع الحال لا يحدث إلا إذا كان أحد الوسطين موصلاً جيد التوصيل) وفي هذه الحالة تصبح المعادلة الأخيرة كما يلي:-

$$H_{t2}\ \Delta L - H_{t1}\ \Delta L \approx K\ \Delta L$$

وعندما تؤول ΔL إلى الصفر (بعد أن يتم القسمة عليها) يتم الحصول على ما يلي-

:

$$H_{t2} - H_{t1} = K \quad \textbf{(62a-1)}$$

وأما كثافة الفيض المغناطيسي الماسة للسطح فترتبط كما يلي:-

$$B_{t2}/\mu_2 - B_{t1}/\mu_1 = K \qquad \textbf{(62b-1)}$$

أي أن عدم الاستمرارية في قيم المجال المغناطيسي الماس للسطح الفاصل بين الوسطين (إن وجدت) تساوي كثافة التيار الخطية K. ونظراً للارتباط التعامدي بين المجال المغناطيسي وكثافة التيار فيتم كتابة المعادلة (62a-1) كما يلي:-

$$\mathbf{a}_n \times (\mathbf{H}_1 - \mathbf{H}_2) = \mathbf{K} \qquad \textbf{(63-1)}$$

يتم تنفيذ العلاقة الأخيرة عند السطح الفاصل بين الوسطين علماً بأن $\mathbf{a}_n$ هومتجه وحدة طول عمودي على السطح الفاصل كما هو مبين في الشكل أعلاه.

المحث والطاقة المغناطيسية

يعتبر المحث (Inductor) بأنه النبيطة التي تقوم بخزن الطاقة المغناطيسية (magnetic energy) أو أنه ومن خلاله يتم ربط الدارات الكهربائية مع بعضها مغناطيسياً عبر خطوط المجال المغناطيسي أو الفيض المغناطيسي Ψ_m . وتعرف محاثة (Inductance) المحث L كما يلي:-

$$L = \Psi_{mL} / I \quad H \qquad \textbf{(64-1)}$$

حيث إن Ψ_{mL} هي كمية الفيض المغناطيسي الترابطي، و **I** هوالتيار المنتج لهذا الفيض. وبما أن المحث هو نبيطة لتخزين الطاقة المغناطيسية فإن المحاثة تتناسب مع هذه الطاقة المخزنة وتمثل الطاقة المخزنة أو الشغل المبذول لخزن هذه الطاقة في حجم **V** ويمكن الاستفادة من العلاقات التي تم اشتقاقها للمواسع ، المعادلة (1-33)، وتطبيقها على المحث كما يلي:-

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{1}{2} \iiint_V \mathbf{B} \bullet \mathbf{H} \ dV$$

(65a-1)

أو أن الطاقة المغناطيسية المخزنة **Wm** هي كما يلي:-

$$W_m = \frac{1}{2} L I^2 = \frac{\mu}{2} \iiint_V |\mathbf{H}|^2 \ dV \quad J$$

(65b-1)

ويمكن من المعادلة (65a-1) إيجاد صيغة أخرى للمحاثة كما يلي:-

$$L = \frac{1}{I^2} \iiint_V \mathbf{B} \bullet \mathbf{H} \quad dV \quad H$$

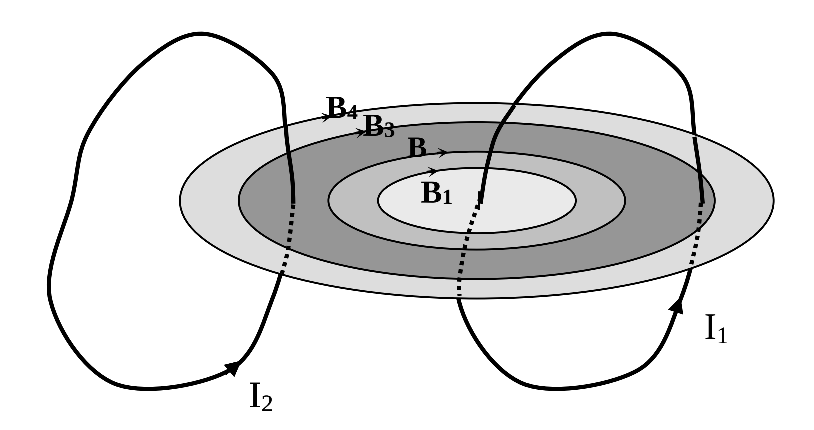
(66-1)

حيث إن V يمثل الحجم الذي يخّزن فيه الطاقة المغناطيسية. كذلك من العلاقة (65-1) يمكن إيجاد كثافة هذه الطاقة المغناطيسية المخزنة أو

$$w_m = \frac{1}{2} \; \mathbf{B} \bullet \mathbf{H} = \frac{1}{2} \mu |\mathbf{H}|^2 \qquad J/m^3$$

(67-1)

ولتوضيـح المحاثة سواءً كان ذلك عبر العلاقة (64-1) أو (66-1) فقد تم أخذ الشكل (38-1) الذي يبين دارتين متجاورتين مبيناً عليهما خطوط B الناتجة عن الدارة التي تحمل تياراً مقدارهI1 . ويلاحظ أن هناك أربعة خطوط B1 و B2وهي خطوط محصورة في الدارة الأولى وحولها، أما B3و B4فهي خطوط تربط الدارة الأولى مع الدارة الثانية. وبالتالي فإن الخطوط B1 و B2يمثلان محاثة ذاتيـة L1 للدارة الأولى أما B3 و B4 فيمثلان محاثة تبادلية L12 وسيتم تقديم عددٍ من الأمثلة لتوضيح كل من المحاثة الذاتية والمحاثة التبادلية والطاقة المغناطيسية المخزنة.



الشكل (1-38):-دارتان متجاورتان الأولى تحمل تياراً I1 والثانية تحمل تياراً I2 وخطوطB الناتجة من الدارة الأولى التي تربط الدارة الأولى بالثانية.

مثال (1 23):- يبين الشكل (1-39) كابل محوري مكون من موصل داخلي نصف قطره aونفاذيته $\mu_0 \ H/m$ ويحمل تياراً Iوموصل خارجي رقيق نصف قطره b ونفاذيته $\mu_0 \ H/m$ ويحمل تياراً I- . إذا كان الوسط بين الموصلين غير مغناطيسي ونفاذيته $\mu_0 \ H/m$ فأوجد الطاقة المغناطيسية المخزنة في الموصل الداخلي وفي المنطقة بين الموصلين لكل وحدة طول وكذلك أوجد المحاثة الكلية لهذا الكابل لكل وحدة طول.

الحـــل:-

يتم إيجاد المجالات المغناطيسية في المناطق المختلفة ومنها يستنتج ما هو مطلوب في هذا المثال. يلاحظ أنه وبسبب التماثل في الكابل المحوري فإن المجال المغناطيسي لا يتغير مع ϕ أو z وليس له إلا عنصراً واحداً باتجاه $\mathbf{a}_\phi$. وتكون المجالات المغناطيسية في المنطقة $0 \le \rho \le a$ كما يلي:-

$$\oint_L \mathbf{H}_1 \bullet \mathbf{dL} = \iint_S \mathbf{J} \bullet \mathbf{dS} \Rightarrow 2\pi\rho H_{\phi 1} = \frac{I\rho^2}{a^2}$$

أو

$$H_{\phi 1} = \frac{I\rho}{2\pi a^2} \quad A/m$$

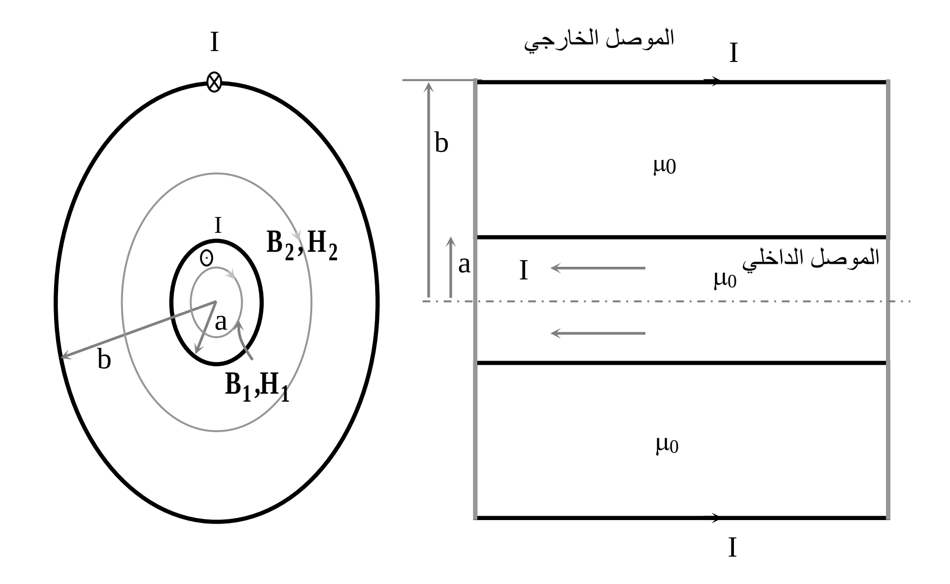
و

$$B_{\phi 1} = \frac{\mu_0 I\rho}{2\pi a^2} \quad Wb/m^2$$

وبالتالي فإن الطاقة المغناطيسية لكل وحدة طول لهذا الموصل هي كما يلي:-

$$W_m = \frac{1}{2}\int_0^{2\pi}\int_0^{a}\int_0^{1} \mathbf{B} \bullet \mathbf{H} \; \rho\, d\rho\, d\phi\, dz$$

$$= \frac{\mu_0}{2}\int_0^{2\pi}\int_0^{a}\int_0^{1} \frac{I^2 \rho^3}{4\pi^2 a^4}\, d\rho\, d\phi\, dz = \frac{\mu_0 I^2}{4\pi a^4} \left. \frac{\rho^4}{4} \right|_0^a = \frac{\mu_0 I^2}{16\pi} \quad J/m$$



الشكل(1-19):-الكابل المحوري بنصفي قطر داخلي وخارجي للموصلين a و b على التوالي.

أما المحاثة لهذا الموصل فهي المحاثة الذاتية له وتساوي

$$\frac{1}{2} L_i \, I^2 = W_m = \frac{\mu_0 \, I^2}{16 \, \pi} \Rightarrow L_i = \frac{\mu_0}{8 \, \pi} \qquad H/m$$

في المنطقة $a \le \rho < b$

$$\oint_L \mathbf{H}_2 \bullet \mathbf{dL} = 2\pi\,\rho H_{\phi_2} = I \Rightarrow H_{\phi_2} = \frac{I}{2\,\pi\rho}\ A/m \Rightarrow\Rightarrow B_{\phi_2}$$

$$= \frac{\mu_0\, I}{2\pi\,\rho}\ Wb/m^2$$

وتصبح الطاقة المغناطيسية المخزنة لكل وحدة طول كما يلي:-

$$W_m = \frac{1}{2}\int_0^{2\pi}\int_a^b\int_0^1 \mathbf{B} \bullet \mathbf{H}\ \rho\, d\rho\, d\phi\, dz$$

$$= \frac{\mu_0}{2}\ \frac{I^2}{4\pi^2}\ \mathrm{Ln}\,(b/a)\ 2\pi 1 = \frac{\mu_0\, I^2\ \mathrm{Ln}\,(b/a)}{4\pi}\quad J/m$$

أما المحاثة التبادلية بين الموصلين فهي

$$\frac{1}{2}\ L_0\, I^2 = \frac{\mu_0\, I^2\ \mathrm{Ln}\,(b/a)}{4\pi} \Rightarrow L_0 = \frac{\mu_0}{2\pi}\quad \mathrm{Ln}\,(b/a)\qquad H/m$$

وبالتالي فإن المحاثة الكلية لهذا الكابل لكل وحدة طول هي

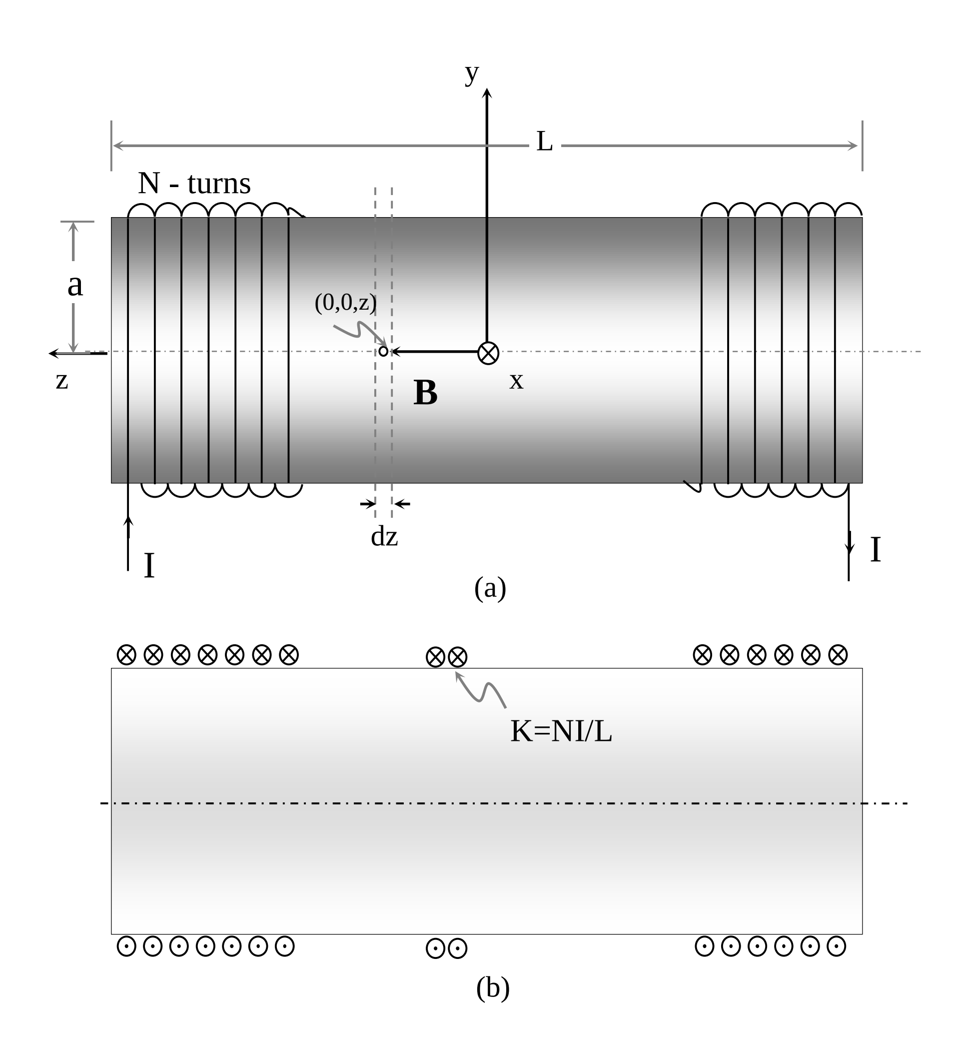
$$L = L_i + L_0 = \mu_0/8\pi + (\mu_0/2\pi) \quad Ln\,(b/a) \qquad H/m$$

مثال (1-24):-يبين الشكل (1-40) ملفاً لولبياً (Solenoid) عدد لفاته N (اللفات متلاحقة مع بعضها) طوله L ونصف قطره a وقلبه من الهواء. إذا كان التيار المار فيه I فأوجد محاثة هذا الملف. (ملاحظة :- أوجد كثافة الفيض المغناطيسي في وسط الملف وأفترض أن $L >> a$).

الحـــل:-

إذا كانت اللفات متلاحقة بما فيه الكفاية فيمكن أن يتم تعريف الكمية $N\,I/L \;\; A/m$ **على أنها كثافة التيار الخطي وذلك مناظراً لصفيحة تحمل هذا التيار** $K = N\,I/L \;\; A/m$ **. وبالتالي فإذا ما استخدمت نتيجة المثال (1-17) حيث إن التيار في ذلك المثال يستبدل بالكمية** $Kdz = N\,I\,dz/L$ **وبالتالي فإن كثافة الفيض المغناطيسي لهذا الجزء من الملف اللولبي تكون كما يلي:-**

$$dB_z = \frac{\mu \;\; a^2 \; N\,I\,dz}{2\,L\,(z^2 + a^2)^{3/2}} \qquad Wb/m^2$$


y
L
N - turns
a
(0,0,z)
z
B
x
dz
I
I
(a)
K=NI/L
(b)

الشكل (a)(1-40):- ملف لولبي بطولL ونصف قطر a وعدد لفاته N ويسري فيه تيار I(b) مقطع في الملف مبين عليه كثافة التيار الخطي $K = N I/L$.

وبالتالي فإن كثافة الفيض المغناطيسي للملف عند نقطة الأصل تكون كما يلي:-

$$B_z = \int_{-L/2}^{L/2} \frac{\mu\, a^2 NI\, dz}{2L\,(z^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{\mu\, a^2\, N I}{2\, L}\; \frac{L}{a^2}\; \frac{z}{\sqrt{z^2 + a^2}} \Big|_{-L/2}^{L/2}$$

أو

$$B_z = \frac{\mu\; N I}{\sqrt{L^2 + 4\, a^2}} \qquad Wb/m^2$$

وإذا كانت L >> a فإن $\sqrt{L^2 + 4\, a^2} \approx L$ **أو أن كثافة الفيض المغناطيسي في مركز الملف تصبح**

$$B_z = \mu\, N\; I/L \qquad Wb/m^2$$

أما إذا كان المطلوب إيجاد كثافة الفيض المغناطيسي عند أحد طرفيه فإنها تكون كما يلي:-

$$B_z = \int_0^L \frac{\mu\;\; a^2\; N\, I\;\, d_z}{2\, L\, (z^2 + a^2)^{3/2}} = \frac{\mu\;\; N I}{2\, L}\; \frac{L}{a^2}\; \frac{z}{\sqrt{z^2 + a^2}} \Big|_0^L$$

$$B_z = \frac{\mu \quad N I}{2\sqrt{L^2 + a^2}} \sim \frac{\mu \quad N I}{2 L} \qquad Wb/m^2$$

أو

ويمكن إيجاد المحاثة لهذا الملف من العلاقة (1-64) حيث إن الفيض المغناطيسي

الذي يربط كل لفه هو **Wb** $\Psi_{mL} = (\mu \quad N I/L) \; \pi a^2$

وحيث إن هناك N لفه فإن كل الفيض الترابطي هو

$$\Psi_{mt} = (\mu \quad N^2 \; I/L) \quad \pi a^2 \; \textbf{Wb}$$

وتكون محاثة الملف كما يلي:-

$$L = \Psi_{mt} / I = (\mu \quad N^2 / L) \; \pi a^2 \qquad H$$

مثال (1-25):- يبين الشكل (1-41) ملفاً حلقياً (toroidal coil) عدد لفاته N لفه

ونصف قطر الحلقة $\rho 0$ ونصف قطر الملف a، فإذا كان قلب هذا الملف هو من

مادة حديدية نفاذيتها $\mu_r \; \mu_0$ فأوجد حاثية هذا الملف.

الحـــل:-

يمكن القول أن الملف الحلقي هو ملف لولبي تم ثنيه ليصبح كما هو مبين في

الشكل (1-41) وطوله $L = 2\,\pi\,\rho_0$ وبالتالي فإن المحاثة لهذا الملف الحلقي

تكون كما يلي:-

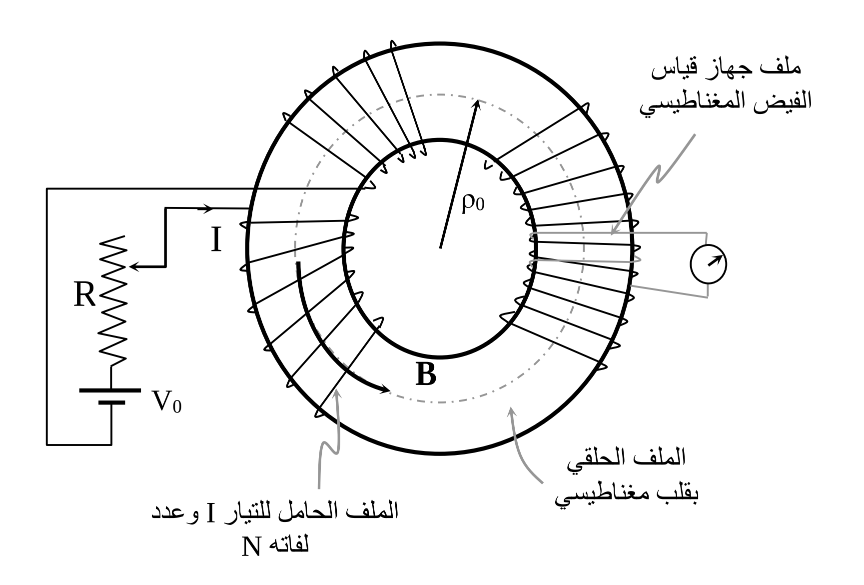
$$L = \frac{\mu \quad N^2}{L} \pi a^2 = \frac{\mu \quad N^2}{2\pi\rho_0} \; \pi a^2 = \frac{\mu \;\; N^2 \, a^2}{2\,\rho_0} \qquad H$$

الشكل (1-41):-ملف حلقي مكون من N لفه وقلبه من مادة حديدية نفاذيتها

$.\mu_r \; \mu_0 \;\; H/m$

منحنى B-H أو الأنشوطة التخلفيةHysteresis loop

تم سابقاً اقتراح العلاقة بين كثافة الفيض المغناطيسي B والمجال المغناطيسي H لمادة ما (أو لوسط ما) وذلك على الشكل $\mathbf{B}=\mu\mathbf{H}$ حيث إن μ يمكن أن ينظر لها على أنها كمية تتناسب مع عدد ثنائيات القطب المغناطيسية للمادة. وهذه العلاقة تبين أن B و Hيرتبطان بعلاقة خطية وهذا ينطبق فقط على المواد غير المغناطيسي ة حيث إن $\mu = \mu_0$ وينظر إلى μ_0 على أنها ثابت الوسط المغناطيسي. أما في حالة المواد المغناطيسية فإن العلاقة بين B و H ليست خطية ويمكن في الواقع قياس هذه العلاقة وذلك من خلال استخدام ملف حلقي قلبه من مادة مغناطيسية. ويتم استخدام ملف آخر لأجل قياس الفيض المغناطيسي داخل القلب الناتج عن التيار الذي يمر في الملف الأصلي والذي ينتج مجالاً مغناطيسياً داخل قلبه $H = IN/L$ حيث إنLيمثل $2\pi\rho_0$. ويبين الشكل -42) (1التفاصيل المستخدمة لقياس العلاقة بينBو Hحيث يتم قياسBباستخدام جهاز قياس الفيض المغناطيسي.



الشكل (1-42):-الملف الحلقي المستخدم لقياس العلاقة بينBوH.

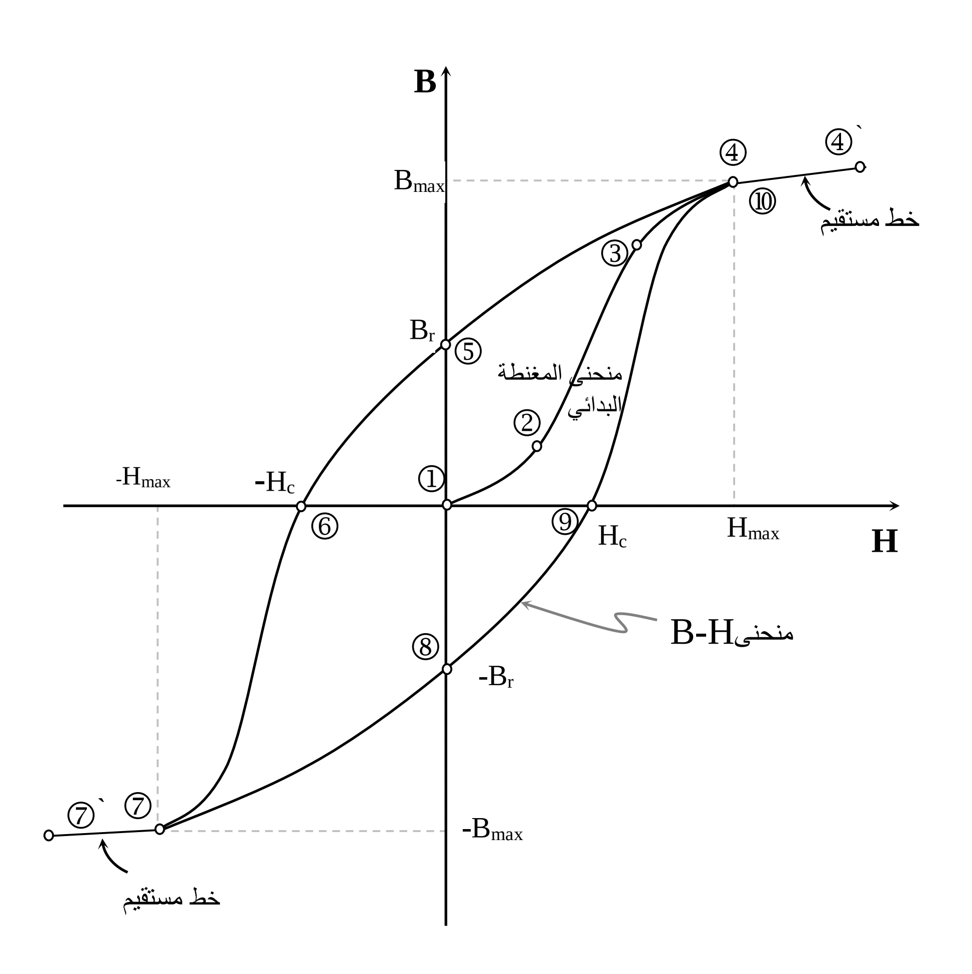
يتم افتراض أن القلب المغناطيسي لم يتعرض قبل ذلك لأي مجالات مغناطيسية وبالتالي فإنه لا يحوي إي اصطفاف لثنائيات القطب المغناطيسية. في ضوء ذلك إذا كان التيار I = 0فإن H = 0 وبالتالي فإن B = 0وبعد هذا إذا ما تم زيادة H بعض الشيء فإن القوى الداخلية والعشوائية الخارجية تكون عالية وعليه فإن تغير B مع ازدياد H يكون بطيئاً حتى تصل H إلى قيمة معتبرة تكون أعلى من القوى الأخرى وعندها فإن تغير B مع ازدياد H يصبح أوضح وبشكل متسارع، و يدعى هذا الجزء بالمنطقة سهلة المغنطة.

وعندما يزداد H بعد ذلك نرى أن التغير في B قد تباطئ وبشكل واضح وهذا مرده أن هناك عدداً قليلاً من ثنائيات القطب المتبقية والتي لم تصطف باتجاه H ولذلك يصعب تغيير موقعها. ولكن وبوصول Hإلى Hmax (أعلى قيمة لازمة لجعل كل ثنائيات القطب المغناطيسي داخل القلب تصطف باتجاه H) فإن $B = B_{max}$ وبعد ذلك فإنه لن يكون هناك ثنائيات قطب إضافية للاصطفاف

وعليه فإنه ولكل القيم $H > H_{max}$ فإنB تزداد تبعاً لثابت الوسط μ_0 (خط مستقيم)، ويبين الشكل (1-43) منحنى B-H(B-H Curve) أو الأنشوطة التخلفية (hysteresis loop). يلاحظ أنه إذا ما تم تخفيض H إلى قيم أقل من Hmaxفإن مسار العلاقة بين B وH لا ترجع إلى المنحنى الموسوم 1-2-3-4 وإنما يرجع بمسار أخر هو 4-5. وعندما تصل H إلى الصفر، يلاحظ أن B لن تكون صفراً وإنما تأخذ قيمة يطلق عليها اسم كثافة الفيض المغناطيسي المتخلفة أوالمتبقية Br(residual) . وللتخلص من ثنائيات القطب المغناطيسية المتبقية (Br)

فإنه لابد من تخفيض قيمة H في الاتجاه الأخر حتى تصل إلى قيمة سالبة يطلق عليها اسم المجال المغناطيسي القهري Hc-(coersive). عندما تصل H إلىHc- فإن B تصبح صفراً أو بالتالي فإن ثنائيات القطب المغناطيسية تكون قد اختفت كلياً في المادة.

وإذا ما استمرت عملية تخفيض المجال المغناطيسي فإن العلاقة بين B و H تأخذ المسار 5-6-7 حتى تصل قيمة H إلى Hmax-. عند هذه القيمة فإن $B = B_{max}$ **وتكون كل ثنائيات القطب المغناطيسية قد اصطفت في الاتجاه المعاكس وإذا ما تم زيادة H من Hmax- إلى الصفر فإن العلاقة بين B و H تأخذ المسار 7-8 وإذا ما استمرت بالزيادة فإن العلاقة تأخذ المسار 8-9-10 . وبالتالي فإن المسار من 4-5-6-7-8-9-10 تمثل منحنى B-H أو الإنشوطة التخلفية المغناطيسية.**


B
H
Bmax
Br
-Br
-Bmax
-Hmax
-Hc
Hc
Hmax
منحنى المغنطة
البدائي
منحنى B-H
خط مستقيم
خط مستقيم

الشكل (1-43):-منحنى B - H أو الأنشوطة التخلفية المغناطيسية.

و تمثل المساحة المحددة داخل هذه الإنشوطة كمية الشغل المبذول لاصطفاف ثنائيات القطب المغناطيسية وإعادة اصطفافها وتدعى بالطاقة المهدورة في مغنطة وإعادة مغنطة المادة أو ببساطة فإن هذه المساحة تدعى بفقدان التخلفية (hysteresis loss). وتتغير تفاصيل هذا المنحنى من مادة لأخرى ويمثل الثنائي Br و Hc معياراً لخاصية المادة المغناطيسية. فإذا كانت Hc صغيرة فإن المادة تعتبر مادة مغناطيسية ضعيفة أي أنها لا تحافظ على اصطفاف ثنائيات القطب المغناطيسية تحت تأثير قوة خارجية متدنية. أما إذا كانت قيم Br مرتفعة نسبياً وكذلك Hc فإن هذا يعكس خصائص مغناطيسية قوية للمادة أي أنه إذا تم مغنطة المادة أو اصطفاف عدد من ثنائيات القطب المغناطيسية فإن هذه المغنطة أو هذا الاصطفاف سيبقى حتى بعد زوال المجال المغناطيسي المؤثر ولن يتغير الوضع تحت قوى خارجية متدنية أومتوسطة . ويستخدم النوع الأخير من المواد لتصنيع المغناطيس الدائم أو أوساط تسجيل البيانات والمعلومات مغناطيسياً مثل الأشرطة المغناطيسية لتسجيل الصوت وكذلك الصور وأقراص الحاسوب الممغنطة.

وتجدر الإشارة إلى أن منحنى B-H يعطي قيماً للنفاذية μ تجعلها تفقد معناها الذي تم تقديمه سابقاً. فمثلاً تكون $\mu \approx \pm 0$ عند كل من النقطة 6والنقطة9 وكذلك فإنها تكون $\mu \rightarrow \pm\infty$ عند النقطتين 5 و 8. يبين منحنى B-H أن قيم μ تتراوح ما بين $-\infty$ و $+\infty$ مروراً في الصفر وذلك على المنحنى 4-5-6-7-8-9-10 الذي يطلق عليه بأنه منحنى B-H. وتكون قيم μ في المنطقة $4-4'$ و $7-7'$ مساوية لنفاذية الهواء μ_0. ويطلق على المنحنى 1-2-3-4 بأنه منحنى المغنطة البدائي أو الأولي.

الدارات المغناطيسية Magnetic Circuits

تتكون الدارات الكهربائية للتيار المستمر من مصدر جهدهVb (بطارية) يتم وصله إلى مقاومةR أو مجموعة من المقاومات... R1 , R2, (موصولة بشكل معين) وذلك كما هو مبين في الشكل (1-44a). ويتم استخدام قوانين الدارات الكهربائية (مثلا قانون أوم وقانوني كيرشوف للفولطية والتيار ... الخ) لتحليل هذه الدارات. ويبين هذا الشكل أن المصدر الكهربائي Vb يتغلب على المقاومة الكهربائية Rلتسيير تيار كهربائي I فيها. أما الشكل (1-44b)

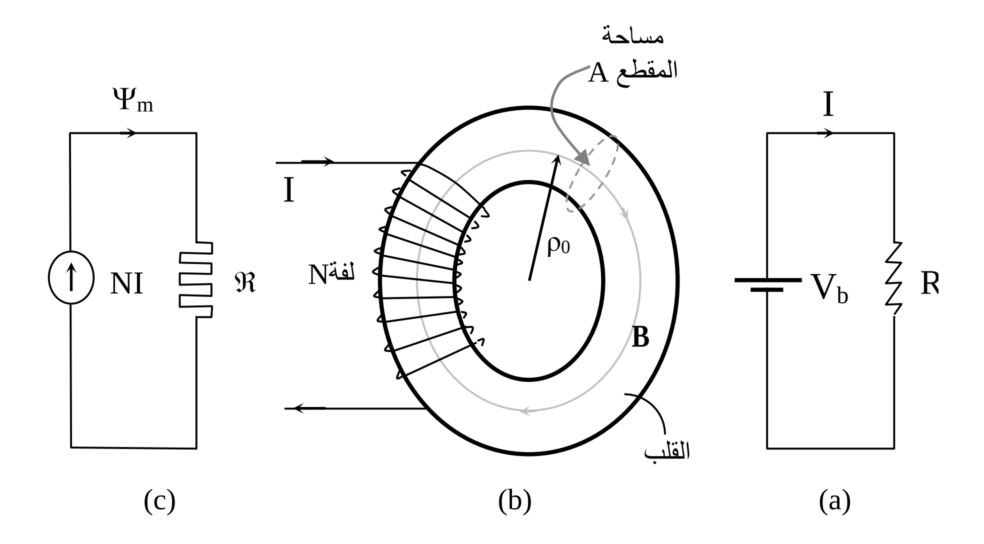
فإنه يبين ملفاً حلقياً عدد لفاته N بقلب من مادة مغناطيسية حيث ينتج عن التيار I المار في هذا الملف فيض مغناطيسي مقداره $\Psi_m \ (= BA) \ \ Wb$. ويمكن القول هنا أن هذا المصدر المغناطيسي N I يتغلب على المقاومة المغناطيسية أو المقاصرة $\Re$ (Reluctance)للقلب الحلقي لتسيير فيض مغناطيسي Ψ_m في هذا القلب، ويبين الشكل (44c-1) تمثيلاً لهذه الدارة المغناطيسية المكافئة. وتحكم الدارة الكهربائية العلاقات التالية:-

$$V_b = I R \ \ V \ \text{و} \ I = V_b / R \ \ A \ \text{و} \ R = V_b / I \ \left(= L/(\sigma A)\right) \ \Omega$$

أما العلاقات التي تحكم عمل الدارة المغناطيسية فيمكن كتابتها اعتمادا على العلاقات السابقة والدارة المبينة في الشكل (44c-1)كما يلي :-

$$A \qquad N I = \Psi_m \ \Re \qquad \textbf{(67a-1)}$$

$$Wb \qquad \Psi_m = NI / \Re \qquad \textbf{(67b-1)}$$



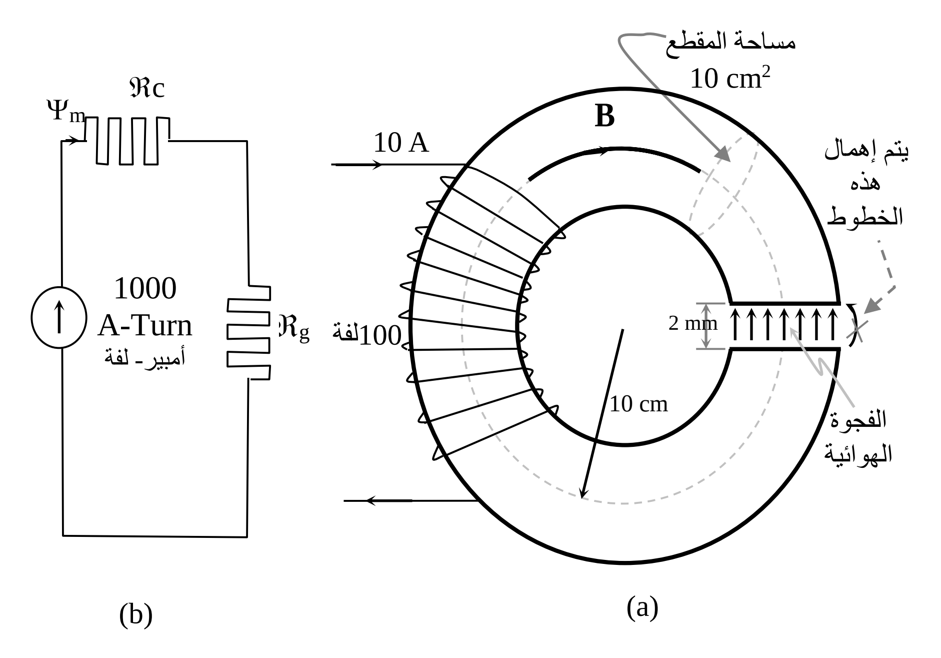
$$\Re \;=\; N\,I/\Psi_m \left(= HL/(\mu\,H\,A) = \;L/(\mu\,A)\right) \;\; H^{-1} \qquad \textbf{(67c-1)}$$

الشكل (1-44):- (a) الدارة الكهربائية (b) ملف حلقي بعدد لفات N لفه (c) الدارة المغناطيسية المكافئة.

ونظراً للتشابه بين الدارة المغناطيسية والكهربائية ($N\;I \;\to\; V_b\;\; \Psi_m \to I$ و $\Re \;\to\; R$) فإنه يتم استخدام القوانين والنظريات المستخدمة في الدارات الكهربائية لتحليل الدارات المغناطيسية.

ولهذه الدارات المغناطيسية أهميتها في دراسة المحولات الكهربائية والآلات الكهربائية، وسيتم فيما يلي تقديم مثالين لتوضيح فكرة تحليل هذه الدارات.

مثال (1-26):- يبين الشكل (1-54) ملفاً حلقياً نصف قطره 10 cm بفجوة أو ثغرة هوائية (air gap) سمكها 2 mm، فإذا كانت مساحة مقطعه تساوي 10 cm2 وكانت نفاذية مادته هي $1000\ \mu_0\ \ H/m$ **وعدد لفاته 100 لفة ويمر فيه تيار يساوي 10 A فأوجد الفيض المغناطيسي** Ψ_m **وكثافة B في الفجوة الهوائية (يستخدم مثل هذا الملف الحلقي في القراءة من والكتابة على شريط مغناطيسي يمر من خلال هذه الفجوة). أهمل تسريب خطوط المجال عند الفجوة.**



الشكل (a) (1-45):- ملف حلقي بفجوة هوائية (b) الدارة المغناطيسية المكافئة.

الحـــل:-

يتكون مسار الفيض المغناطيسي من مقاصرتين $\Re c$ للقلب الحلقي المغناطيسي

و$\Re g$ للفجوة الهوائية ويبين الشكل (45b-1) الدارة المغناطيسية المناظرة حيث إن

$$\Re_c = \frac{L}{\mu A} = \frac{2\pi \times 10 \times 10^{-2} \; - 2 \times 10^{-3}}{1000 \times 4\pi \times 10^{-7} \times 10 \times 10^{-4}} = 4.98 \times 10^5 \quad H^{-1}$$

$$\Re_g = \frac{2 \times 10^{-3}}{4\pi \times 10^{-7} \times 10 \times 10^{-4}} = 15.92 \times 10^5 \quad H^{-1}$$

يلاحظ أن المقاومة المغناطيسية للفجوة (بطول 2 mm) تزيد على ثلاثة إضعاف المقاومة المغناطيسية للقلب المغناطيسي الذي يبلغ طوله 62.63 mm. وبالتالي فإن خطوط المجال المغناطيسي المتسربة من القلب الحديدي (المغناطيسي) تكون قليلة (الخطوط المعنية هنا ليست المبينة عند الفجوة الهوائية). في ضوء ما سبق فإن الفيض المغناطيسي في الفجوة أو في القلب يكون كما يلي:-

$$\Psi_m = \frac{N I}{\Re} = \frac{100 \times 10}{\Re_g + \Re_c} = 0.48 \;\; mWb$$

أما كثافة الفيض في الفجوة B_g فهي $B_g = \frac{\Psi_m}{A} = 0.48 \quad Wb/m^2$

مثال (1-27):- في المثال (1-26) إذا كان المطلوب توفير كثافة فيض مغناطيسية في الفجوة الهوائية بمقدار $10\ m\ Wb/m^2$ فأوجد التيار المار في الملف الحلقي المذكور أعلاه لتوفير مثل هذه القيمة.

الحـــل:-

من قيم $\Re c$ و $\Re g$ والفيض المطلوب في الفجوة Ψ_m

$$\Psi_m = 10 \times 10^{-3} \times 10^{-3} = 10^{-5} \quad Wb$$

يمكن استنتاج التيار من العلاقة التالية

$$\Psi_m = NI / \Re \Rightarrow I = \Re\, \Psi_m / N = 0.21 \ A$$

تفاعل الشحنات مع المجالات الكهربائية والمغناطيسية

تم في الفصول السابقة تقديم القوة الكهربائية بين مجال كهربائي خارجي E وشحنة q أو جسم مشحون بشحنة q كما يلي :-

$$\mathbf{F} = q\,\mathbf{E} \qquad N$$

ينتج عن هذه القوة حركة أو إزاحة للشحنة أو الجسم المشحون والذي تبلغ كتلته

مثلاً m kgويتحرك الجسم المشحون، مثلاً، بتسارع مقداره $\mathbf{a}\ \ m/s^2$ وبالتالي

فإنه، حسب قانون نيوتن، يتم إعادة كتابة العلاقة السابقة كما يلي:-

$$\mathbf{F} = q\,\mathbf{E} = m\,\mathbf{a} = m\,\frac{d\mathbf{v}}{dt} = m\,\frac{d^2\,\mathbf{x}}{d\,t^2} \qquad \textbf{(68-1)}$$

حيث إن aهو تسارع الشحنة m/s2 ، وvهي سرعة الشحنة m/s ، و x هي إزاحة

الشحنة (في اتجاه x مثلاً) m .

ويبين الشكل (1-46) توضيحاً لهذه الكميات ويمكن من العلاقات المبينـة في

المعادلـة (1-68) استنتاج تسارع وسرعة وإزاحة الشحنة أو المجال الكهربائي.

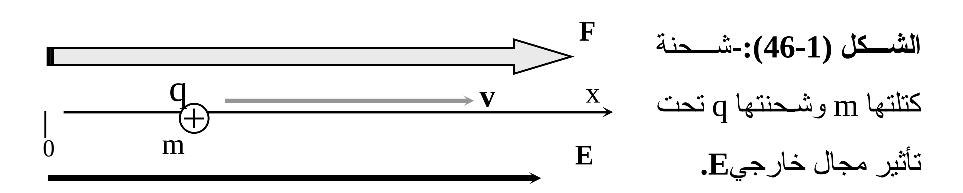
ولهذا التفاعل بين الشحنة والمجال الكهربائي تطبيقاته في الحياة العملية فمثلاً في

راسم الموجة (oscilloscope) تكون الشحنة (الشحنات) إلكترون ينطلق من

المهبط (cathode) يتم جره بوساطة مجال كهربائي بين المهبط والمصعد (anode).

ويرمز عادة لشحنة الإلكترون بالرمز e وبالتالي فإن العلاقة (1-68) تعطي

$$e\,\mathbf{E} = m\,\mathbf{a}$$



الشـــكل (1-46):-شـــحنة كتلتها m وشـحنتها q تحت تأثير مجال خارجي**E.**

ويمكن من العلاقة الأخيرة استنتاج الطاقة اللازمة لجر هذا الإلكترون من x1 إلى x2 كما يلي:-

$$W = m \int_{x_1}^{x_2} \mathbf{a} \bullet dx\, \mathbf{a}_x = e \int_{x_1}^{x_2} \mathbf{E} \bullet d\mathbf{x} = e\, V_{12}$$

أو

$$W = m \int_{x_1}^{x_2} \frac{d\mathbf{v}}{dt} \bullet dx\, \mathbf{a}_x = e\, V_{12}$$

ولكن $\mathbf{v} = \dfrac{d\mathbf{x}}{dt}$ **أو أن**

$$m \int_{v_1}^{v_2} \mathbf{v} \bullet d\mathbf{v} = \frac{1}{2} m\, (v_2^2 - v_1^2) = e\, V_{12}$$

فإذا كانت السرعة الابتدائية للإلكترون مساوية للصفر وكان فرق الجهد بين النقطتين يساويV0 فإن السرعة الأخيرة لهذه الشحنة تصبح كما يلي:-

$$v = \sqrt{\frac{2\ e\ V_0}{m}} = 5.9 \times 10^5\ \sqrt{V_0} \quad m/S$$

كذلك تم في السابق تقديم القوة بين المجال المغناطيسي وطول تفاضلي dL ، كجزء من دارة، يحمل تيار I (وهو عبارة عن شحنات متحركة) كما يلي:-

$$d\mathbf{F} = I\ \mathbf{dL} \times \mathbf{B} = \mathbf{J}\ dV \times \mathbf{B}$$

وبما أن التيار مرتبط مع كثافة الشحنات والسرعة كما يلي :-

$$\mathbf{J} = \rho_v \quad \mathbf{v}$$

فإن القوة تعطي بما يلي:-

$$d\ \mathbf{F} = \rho_v\ (dV)\ \mathbf{v} \times \mathbf{B} = dq\ \mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

أو أن القوة الكلية تصبح كما يلي:-

$$\mathbf{F} = q\ \mathbf{v} \times \mathbf{B} \qquad \textbf{(69-1)}$$

إذا كانت كتلة الشحنة m kg فيمكن، باستخدام قانون نيوتن، إعادة كتابة المعادلة (1-69) كما يلي:-

$$\mathbf{F} = q\ \mathbf{v} \times \mathbf{B} = m\ \mathbf{a} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \qquad \textbf{(70-1)}$$

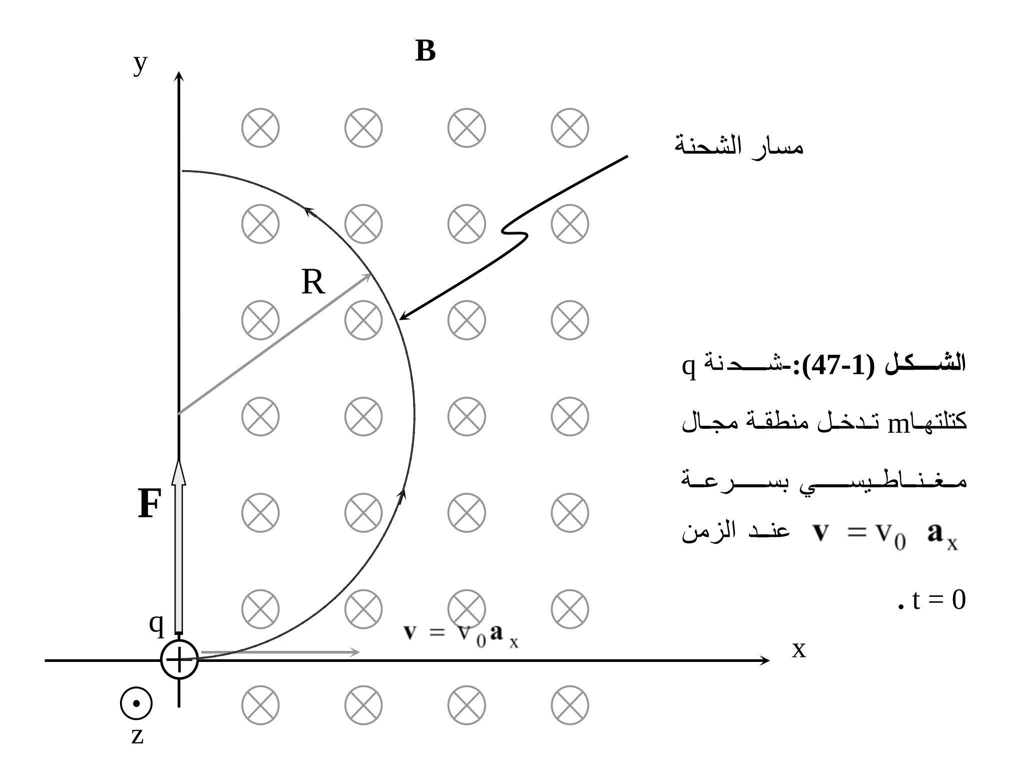
حيث إن a تمثل تسارع الشحنة و v تمثل سرعتها، وبالتالي فإنه يتم تحديد القوة المؤثرة على شحنة متحركة في مجال مغناطيسي من خلال قاعدة اليد اليمنى، ويبين الشكل (1-47) كل من الشحنة المتحركة وكثافة الفيض المغناطيسي B

والقوة الناتجة. فإذا افترض أن هناك شحنة دخلت منطقة المجال المغناطيسي بسرعة $\mathbf{v} = v_0 \ \mathbf{a}_x$ عند الزمن t = 0 وكانت كثافة الفيض المغناطيسي $\mathbf{B} = -B_0 \ \mathbf{a}_z \ Wb/m^2$ فإن حل المعادلة (1-70) يمكن أن يبين ما الذي سيحدث لهذه الشحنة (على افتراض أن شحنتها q C وكتلتها m kg) بعد دخولها.

يتم كتابة المعادلة (1-70) وذلك كما يلي :-

$$\begin{bmatrix} \mathbf{a}_x & \mathbf{a}_y & \mathbf{a}_z \\ v_x & v_y & v_z \\ 0 & 0 & -B_o \end{bmatrix} = \frac{m}{q} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} v_x & \mathbf{a}_x \\ v_y & \mathbf{a}_y \\ v_z & \mathbf{a}_z \end{bmatrix}$$

(71-1)



الشكل (1-47):-شحنة q كتلتها m تدخل منطقة مجال مغناطيسي بسرعة $\mathbf{v} = v_0 \mathbf{a}_x$ عند الزمن $t = 0$.

تحدد هذه المعادلة العلاقة بين سرعة الشحنة **v** (أو تسارعها $d\mathbf{v}/dt$) وكتلتها **m** وشحنتها **q** وكثافة الفيض المغناطيسي **B** $(\mathbf{B} = -B_0\ \mathbf{a}_z)$ المؤثر عليها ويمكن كتابتها كما يلي:-

$$-B_0\ v_y = \frac{m}{q}\frac{dv_x}{dt} \qquad \textbf{(72a-1)}$$

$$B_0\ v_x = \frac{m}{q}\frac{dv_y}{dt} \qquad \textbf{(72b-1)}$$

$$0 = \frac{m}{q}\frac{dv_z}{dt} \qquad \textbf{(72c-1)}$$

ومن المعادلة (72c-1) يمكن استنتاج التالي:-

$$v_z = v_{0z} \quad m/s \qquad \textbf{(73-1)}$$

حيث إن V_{0z} هو ثابت ويعني انه إذا دخلت شحنة في مجال مغناطيسي باتجاه $\mathbf{a}_z$ بسرعة معينة في اتجاه $\mathbf{a}_z$ فستبقى محافظة على تلك السرعة. ويمكن من المعادلتين (72a-1) و (72b-1) استنتاج vx و vy وذلك من خلال مفاضلة أحدهما والتعويض فيها بالأخرى أو

$$-B_0 \frac{dv_y}{dt} = -B_0 \left(\frac{qB_0}{m}\right) v_x \;\; \frac{m}{q} \frac{d^2 v_x}{dt^2}$$

أو أن

$$\frac{d^2 v_x}{dt^2} + \omega^2 \, v_x = 0 \qquad \textbf{(73b-1)}$$

$$\frac{d^2 v_y}{dt^2} + \omega^2 \, v_y = 0 \qquad \textbf{(73a-1)}$$

حيث إن

$\omega \equiv \dfrac{q\,B_0}{m}$ و $f = \dfrac{q\,B_0}{2\,\pi\,m}$ يمثل التردد الجيروسكوبي (أو التردد الدوراني).

وبالتالي فإن السرعة في اتجاه x (أو اتجاه y) تكون كما يلي:-

$$v_x = A\cos\omega t + B\sin\omega t \qquad \textbf{(74a-1)}$$

وأما السرعة في اتجاه y فيمكن اشتقاقها من العلاقة (72a-1) أو

$$v_y = A\sin\omega t - B\cos\omega t \qquad \textbf{(74b-1)}$$

يتم إيجاد A و B من الشروط الابتدائية أو الأوليـة(initial conditions) حيث

إن $v_x = v_0$ **و** $v_y = 0$ **عند t = 0 أو أن** $A = V_0$ **و 0 = B وبالتالي فإن السرعة في**

اتجاه x و y تصبح كما يلي:-

$$\mathbf{v}_{xy} = v_0 \,(\cos\omega t \;\mathbf{a}_x + \sin\omega t \;\mathbf{a}_y) \quad m/s \qquad \textbf{(75-1)}$$

ويلاحظ أن قيمة السرعة $|\mathbf{v}_{xy}|$ **هي كمية ثابتة وتساوي** v_0 **وبالتالي فإن حركة**

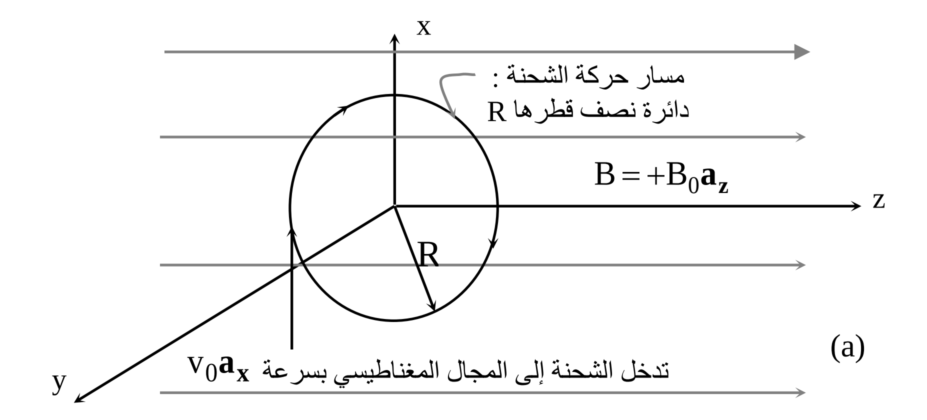
الشحنة ستكون في دائرة نصف قطرها $R = v_0/\omega = v_0 m/(qB_0) \quad m$.

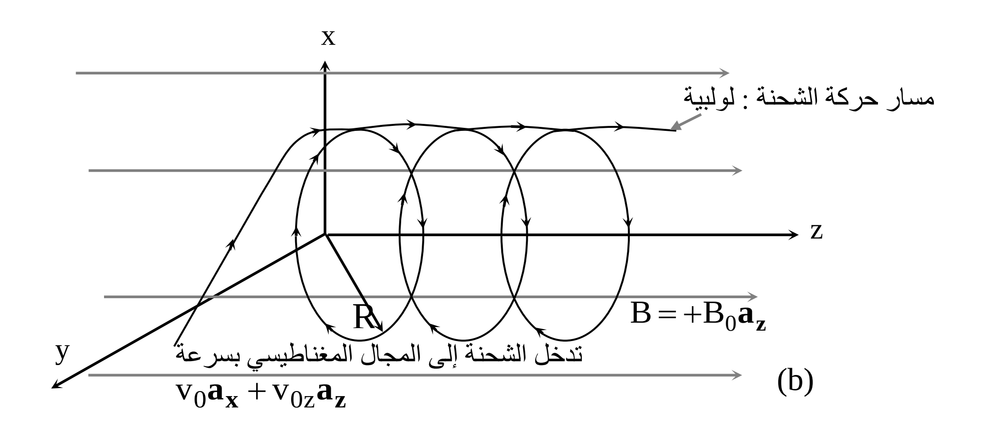
ويمكن استنتاج نصف القطر هذا من التوازن الذي يحدث للشحنة بعد دخولها

المجال المغناطيسي العمودي على اتجاه حركتها بين $F = q\,vB$ **وبين القوة**

الطاردة المركزية $F = m\,v^2/(R) = q\,v\,B$

أو انه في هذه الحالة $R = v_0 m/(qB_0)$. في ضوء ما سبق فإنه إذا دخلت شحنة كتلتها **m kg** وشحنتها **q C** في مجال مغناطيسي كثافة فيضه مثلاً $\mathbf{B} = B_0\ \mathbf{a}_z$ بسرعة عمودية على **B** مقدارها مثلاً $\mathbf{v} = v_0\ \mathbf{a}_x$ فإنها ستتحرك في دائرة نصف قطرها $R = v_0 m/(qB_0)$ m بتردد جيروسكوبي $f = v_0/\omega = q B_0/(2\pi m)$ Hz . أما إذا كانت سرعة هذه الشحنة عند دخولها المجال المذكور هي $\mathbf{v} = v_0\ \mathbf{a}_x + v_{0z}\ \mathbf{a}_z$ m/s فإن حركتها ستصبح لولبية وذلك كما هو مبين في الشكل (1-48). ومن الجدير بالذكر أن هناك فوائد جـمة للانحراف الدائري الذي يحدثه المجال المغناطيسي لشحنة تدخله. في شاشة التلفاز، يتم استخدام ملف بطول محدود لإنتاج مجال مغناطيسي من اجل التحكم في مسار الشعاع الإلكترونى الصادر من مهبط الشاشة وإدخال انحراف كبير في هذا الشعاع. في هذه الحالة، يكون طول الشاشة (من المصعد إلى المهبط) قليلاً جداً إذا ما قورن باستخدام المجالات الكهربائية لإدخال الانحراف في الشعاع الإلكتروني كما هو الحال في راسم الموجة وذلك ما اخذ في الاعتبار في نفس أبعاد الشاشة المرئية.


x
مسار حركة الشحنة :
دائرة نصف قطرها R
$B = +B_0\mathbf{a_z}$
z
R
(a)
y
تدخل الشحنة إلى المجال المغناطيسي بسرعة $v_0\mathbf{a_x}$

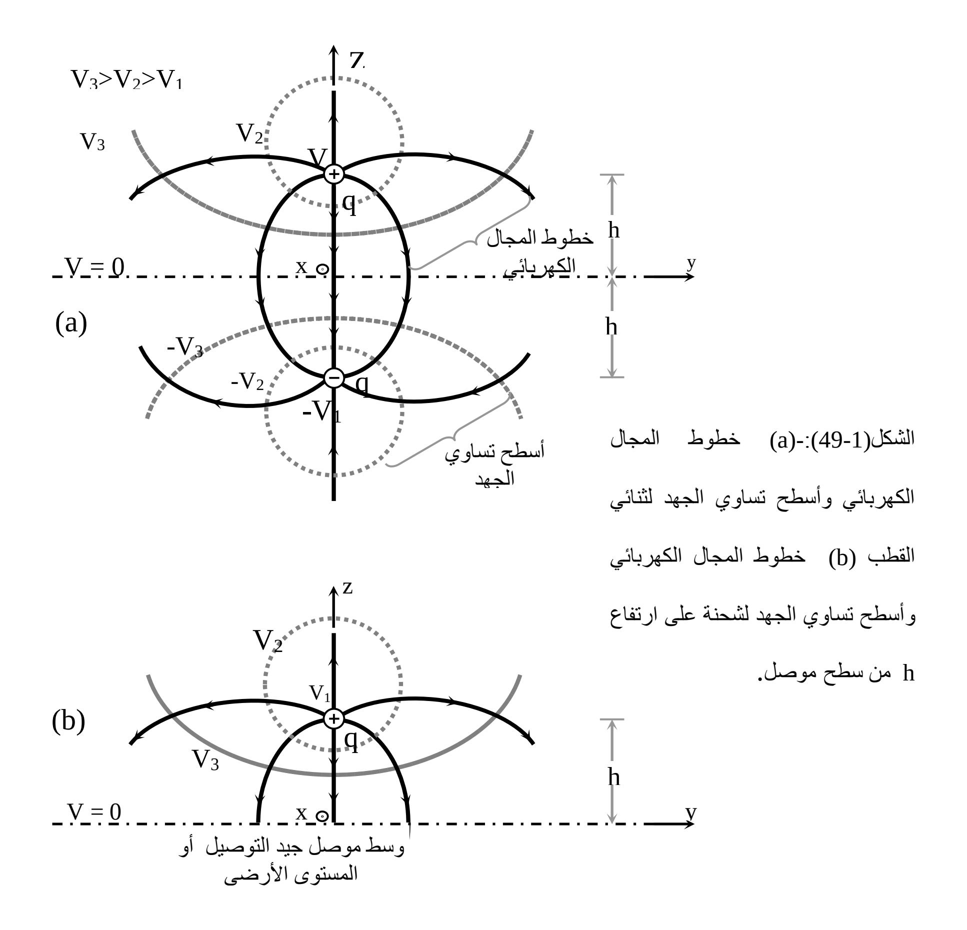

x
مسار حركة الشحنة : لولبية
z
R
$B = +B_0\mathbf{a_z}$
y
تدخل الشحنة إلى المجال المغناطيسي بسرعة
$v_0\mathbf{a_x} + v_{0z}\mathbf{a_z}$
(b)

الشكل (1-48):- دخول شحنة إلى مجال مغناطيسي كثافة فيضه

$\mathbf{B} = B_0\ \mathbf{a}_z\ \text{Wb/m}^2$ (a) سرعة دخولها $\mathbf{v} = v_0\ \mathbf{a}_x\ \text{Wb/m}^2$ (b) سرعة دخولها $\mathbf{v} = v_0\ \mathbf{a}_x + v_{0z}\ \mathbf{a}_z$.

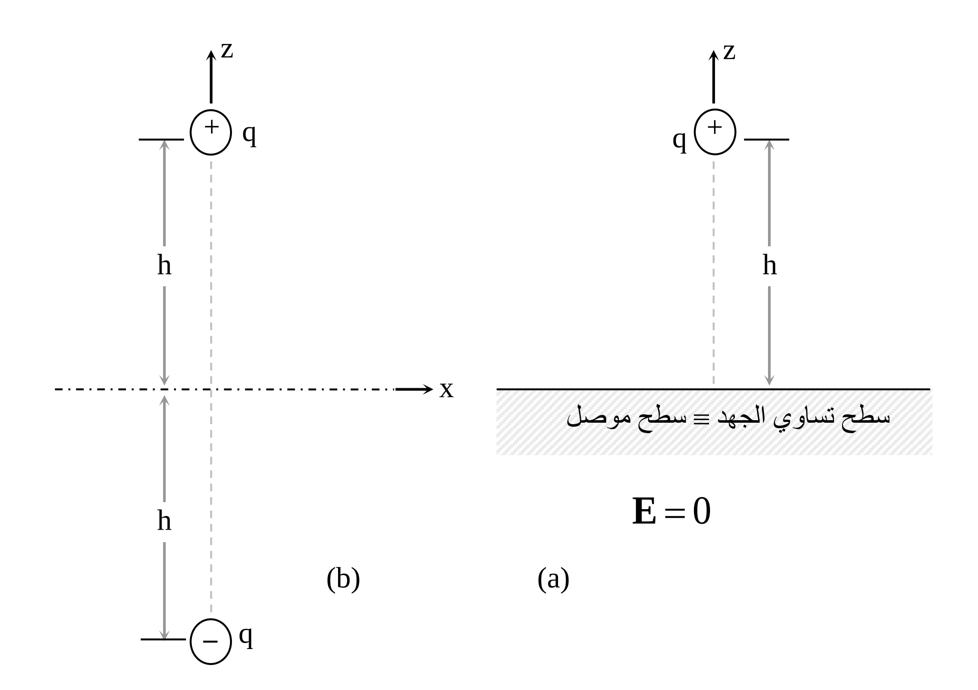
نظرية الصور في المصادر الكهربائية

تم فيما سبق معالجة ثنائي القطب الكهربائي المكون من شحنتين+q و -q يفصل بينهما مسافة 2h وتم بيان خطوط المجال الكهربائي وأسطح تساوي الجهد للثنائي في الشكل (1-49a). يلاحظ أن جهد السطح z = 0 يساوي صفراً وبالتالي يمكن استبداله بسطح موصل جيد التوصيل أو اعتباره مستوى ارضي. يلاحظ تماثل خطوط المجال الكهربائي وأسطح تساوي الجهد في الحالتين المبينتين في الشكل (1-49) للمنطقة $z \geq 0$، أو أن هناك تناظراً بين الحالتين.



الشكل(1-49):-(a) خطوط المجال الكهربائي وأسطح تساوي الجهد لثنائي القطب (b) خطوط المجال الكهربائي وأسطح تساوي الجهد لشحنة على ارتفاع h من سطح موصل.

وبالتالي إذا كان هناك شحنة q+ موضوعة على ارتفاع $z = h$ من سطح موصل (السطح الموصل متساوي الجهد وجهده يساوي صفراً إذا كان مؤرضاً)والذي يكون فيه المجال الكهربائي مساوياً للصفر كما يبين الشكل(1-50a)فإن المسألة المناظرة لهذا الوضع مبينة في الشكل (1-50b). ويطلق على الشحنة التي وضعت عند النقطة $z = h$ بأنها صورة (image) للشحنة العلوية الموضوعة عند النقطة $z = h$. ونظراً للتناظر بين المسألتين في المنطقة $z \geq 0$ فإن إيجاد المجالات الكهربائية وأسطح تساوي الجهد الناتجة عن المسألة المناظرة والمكونة من الشحنة وصورتها تكون أسهل بكثير من إيجادها للمسألة الأصلية، حيث إنه قد تم إيجاد المجالات الكهربائية وأسطح تساوي الجهد للمسألة المناظرة في فصول سابقة.

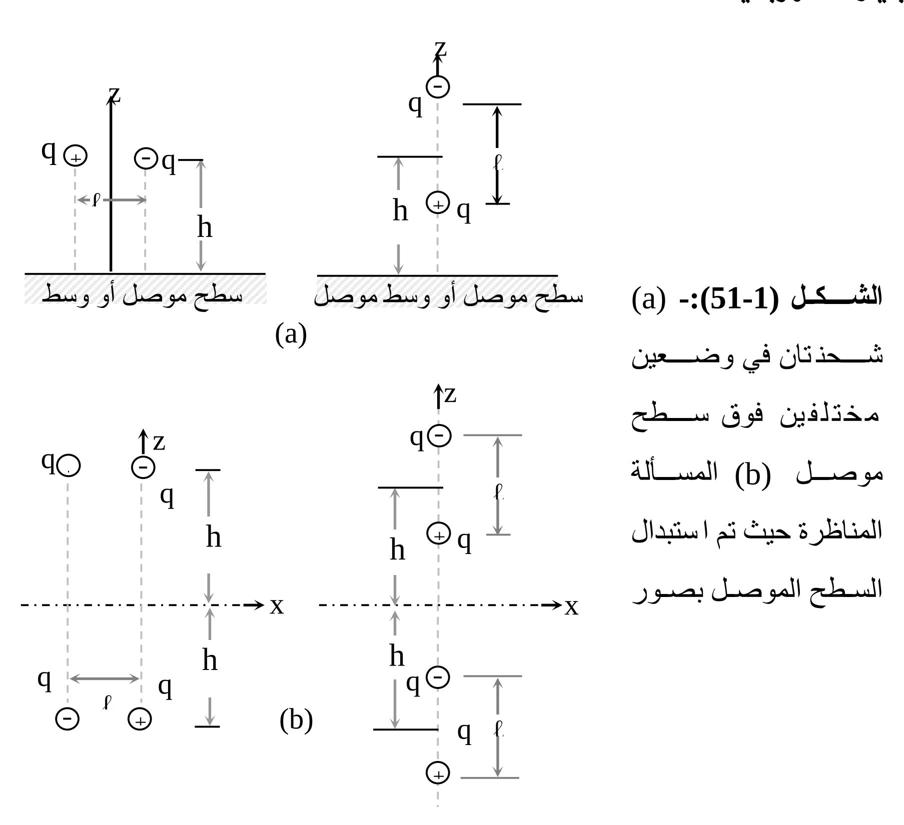


$$\mathbf{E} = 0$$

الشكل (1-50):- (a) شحنة q+ موضوعة فوق سطح موصل وعلى ارتفاع h(b) المسألة المناظرة والمكونة من الشحنة الأصلية وصورتها q- .

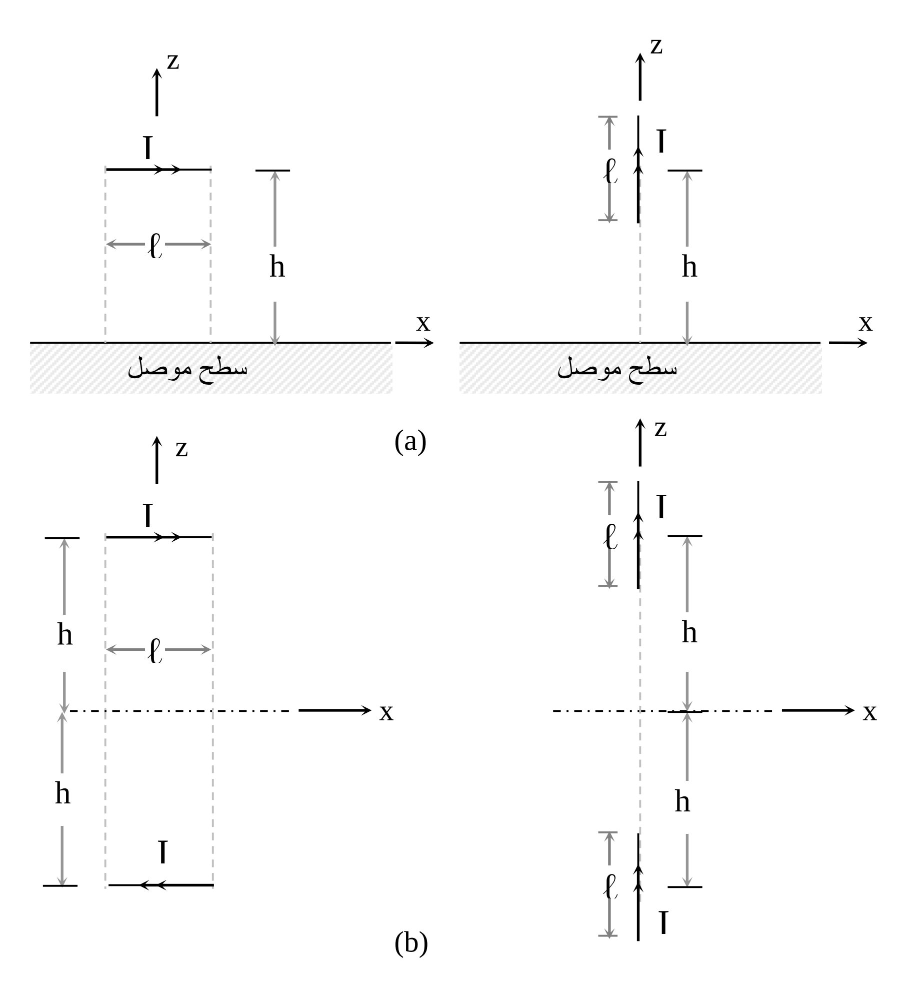
يبين الشكل (1-51a) شحنتين إحداهما موجبة والأخرى سالبة حيث تم وضع هاتين الشحنتين فوق سطح موصل وتم افتراض وضعين مختلفين لهاتين الشحنتين. هذا ويبين الشكل (1-51b) المسألة المناظرة حيث تم استبدال السطح الموصل بمجموعة من صور هذه الشحنات

وذلك حسب ما تم توضيحه وتصبح المسألتان متناظرتين في المنطقة $z \geq 0$. ومن المعروف أن التيار إذا نشأ فإنه يبدأ من نقطة الجهد المرتفع متجهاً إلى نقطة الجهد المنخفض وبالتالي فإنه يمكن استبدال الشحنات الواردة في الشكل (1-51) بتيارات كهربائية.



الشكل (1-51):- (a) شحنتان في وضعين مختلفين فوق سطح موصل (b) المسألة المناظرة حيث تم استبدال السطح الموصل بصور

في ضوء ذلك فإن الشكل (1-52) يبين سلكين صغيرين يحملان تياراً كهربائياً وموضوعين فوق سطح موصل وكذلك المسألة المناظرة حيث إنه قد تم استبدال السطح الموصل بصورة للتيارات الكهربائية المشار إليها أعلاه. يلاحظ أن تيار صورة السلك الأفقي الموازي للسطح الموصل يكون باتجاه معاكس للتيار الأصلي. أما تيار صورة السلك العمودي على السطح الموصل فيكون في نفس اتجاه التيار الأصلي. ويستفاد من هذا عند دراسة الهوائيات التي تكون موضوعة فوق سطح موصل حيث إن معالجة المسألة المناظرة (باستخدام نظرية الصور) تكون أسهل بكثير من معالجة المسألة الأصلية.



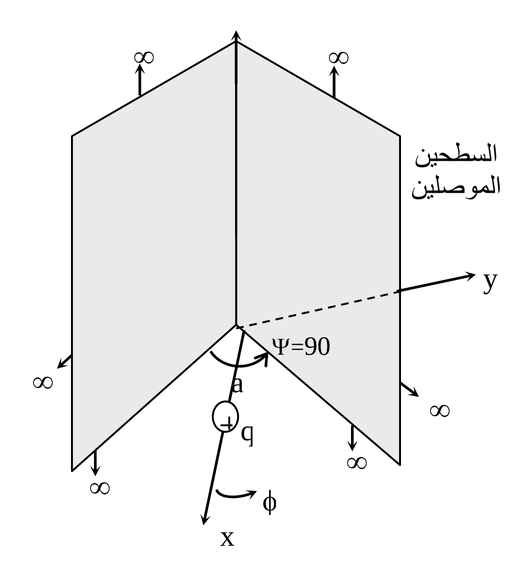
الشكل (1-52):- (a) تيارات كهربائية موضوعة فوق سطح موصل (b) المسائل المناظرة حيث تم استبدال السطح الموصل بصورة لهذه التيارات.

من الجدير بالذكر أن نظرية الصور المذكورة أعلاه لا تختلف عما هو معروف في موضوع المرايا في علم الضوء. في ضوء ذلك فإنه يمكن اعتبار الأسطح الموصلة كأنها مرايا كهربائية أو بمعنى أعم هي مرايا كهرومغناطيسية. ولابد من التذكير بأن الضوء مكون من مجالات كهربائية ومغناطيسية (كهرومغناطيسية). ويمكن استخدام هذا التناظر بين صور المصادر الكهربائية والمرايا في حالة إذا كان المصدر موضوعاً أمام سطحين موصلين مستويين يشكلان مع بعضهما زاوية مقدارها ψ وهذا ما يدعى بالعاكس الزاوي (corner reflector). ويعتبر العاكس المستوي حالة خاصة من هذا النوع حيث إن الزاوية ψ له تكون مساوية 180^{o}. ويتم عادة اختيار الزاوية ψ ليكون خارج قسمة 360^{o} عليها مساوياً لعدد صحيح ويكون عدد الصور الناتجة في هذه الحالة مساوياً $\frac{360^{o}}{\psi}-1$ ويكون عدد المصادر في المسألة المناظرة هو $360^{o}/\psi$ ويتم عادة في الهوائيات اختيار ψ لتكون 90^{o} أو 60^{o} ويبين المثال التالي العاكس الزاوي.

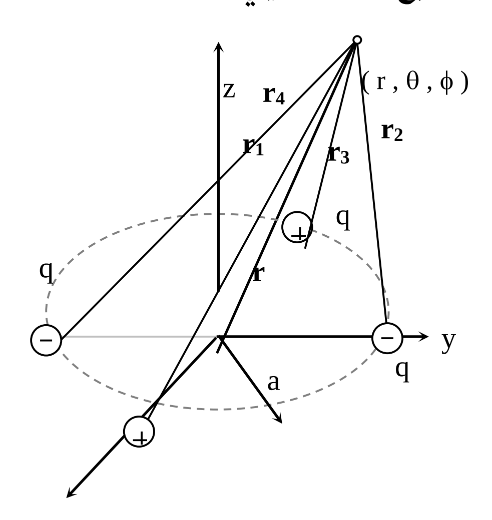
مثال (1-28):- يبين الشكل (1-53) سطحين موصلين مستويين يعملان مع بعضهما زاوية $\psi = 90^o$ (تسمى هـذه الزاوية بزاوية القمـة **Apex Angle**) فـإذا كان هناك شحنة موجبة q+ موضوعة في المستوى المنصف للزاوية وعلـى بعــد x = a من الخط الممثل لتقاطـع السطحين (محور z)، فأوجد المجال الكهربائي E في كل مكان (افترض أن السطحين يمتدان إلى ما لانهاية).

الحـــل:-

من المعلوم أن E سيكون (في المسألة الأصلية) مساوياً للصفر في المنطقة $45^o < \phi < -45^o$ حيث إن الأسطح الموصلة ستعمل على حجب آثار q في هذه المنطقة، وسيكون من السهل معالجة هذه المسألة بحل المسألة المناظرة والتي تم استنتاجها باستخدام نظرية الصور حيث أن هناك دائرة نصف قطرها a يقع على محيطها أربعة مصادر كما هو مبين في الشكل (1-53b) عند $\phi = 0^o$ و $\phi = 90^o$ و $\phi = 180^o$ و $\phi = 270^o$.



يتم إيجاد المجال الكهربائي عند أى نقطة عبر استخدام المجموع الاتجاهي للمجالات الكهربائية الناتجة من الشحنات الأربع وذلك كما يلي-



q
x

(b) (a)

الشكل (1-53):-العاكس الزاوي لزاوية قمة $\psi = 90^o$ بوجود شحنة موجبة q C على بعد a من محور z(a) المسألة الأصلية (b) المسألة المناظرة باستخدام نظرية الصور.

$$\mathbf{E} = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{\mathbf{r}_1}{r_1^3} - \frac{\mathbf{r}_2}{r_2^3} + \frac{\mathbf{r}_3}{r_3^3} - \frac{\mathbf{r}_4}{r_4^3}\right]$$

$$= \frac{q}{4\pi\varepsilon_0}\left[\frac{r\,\mathbf{a}_r - a\,\mathbf{a}_x}{(r^2 + a^2 - 2\,r\,a\sin\theta\cos\phi)^{3/2}}\right.$$

$$- \frac{r\,\mathbf{a}_r - a\,\mathbf{a}_y}{(r^2 + a^2 - 2\,r\,a\sin\theta\sin\phi)^{3/2}}$$

$$+ \frac{r\,\mathbf{a}_r + a\,\mathbf{a}_x}{(r^2 + a^2 + 2\,r\,a\sin\theta\cos\phi)^{3/2}}$$

$$+\frac{r\,\mathbf{a}_r + a\,\mathbf{a}_x}{(r^2 + a^2 + 2\,ra\sin\theta\cos\phi)^{3/2}}$$

$$-\left.\frac{r\,\mathbf{a}_r + a\,\mathbf{a}_y}{(r^2 + a^2 + 2\,r\,a\sin\theta\sin\phi)^{3/2}}\right] \qquad V/m$$

يتم تطبيق العلاقة الأخيرة في المدى $0 \le \theta \le \pi$ و $-45^o \le \phi \le 45^o$ فقط.

ويمكن إيجاد المجال الكهربائي العمودي على السطحين $\phi = \pm 45^o$ وبالتالي إيجاد الكثافة السطحية للشحنات ρ_s.

تم فيما سبق اعتبار الأسطح المستوية، أما في حالة الأسطح غير المستوية فيتم تطبيق نظرية الصور كما يبين المثال التالي الذي يناقش إيجاد المجال الكهربائي لشحنة كهربائية q+ واقعة مثلاً أمام كرة موصلة نصف قطرها a علماً بان هذه الكرة مؤرضة. ويبين الشكل (1-54) كلاً من المسألة الأصلية والمسألة المناظرة ويلاحظ هنا أن صورة الشحنة لن تكون مساوية q وإنما q1 كذلك فإن بعدها عن سطح الكرة لا يساوي بعد المصدر الأصلي عن سطح الكرة الموصل. ومن المرايا والعدسات المحدبة في علم الضوء فإن صورة المصدر ستكون في مركز الكرة إذا كان هذا المصدر موضوعاً في اللانهاية (بعيداً جداً عن الكرة)

أما إذا كان المصدر يلاصق سطح الكرة فإنصورته ستكون أمامه مباشرة. بالتالي فإن مواقع المصدر في المدى $a \le r < \infty$ ستتحول إلى مواقع للصورة في المدى $a \ge r > 0$. وبما أن جهد الكرة يساوي صفراً فإنه يتم اعتبار النقطتين **1** و **2** حيث إن $V_1 = 0 = V_2$ ، فمن النقطة **(1)**

$$V_1 = 0 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\,(b-a)} + \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0\,(a-d)}$$

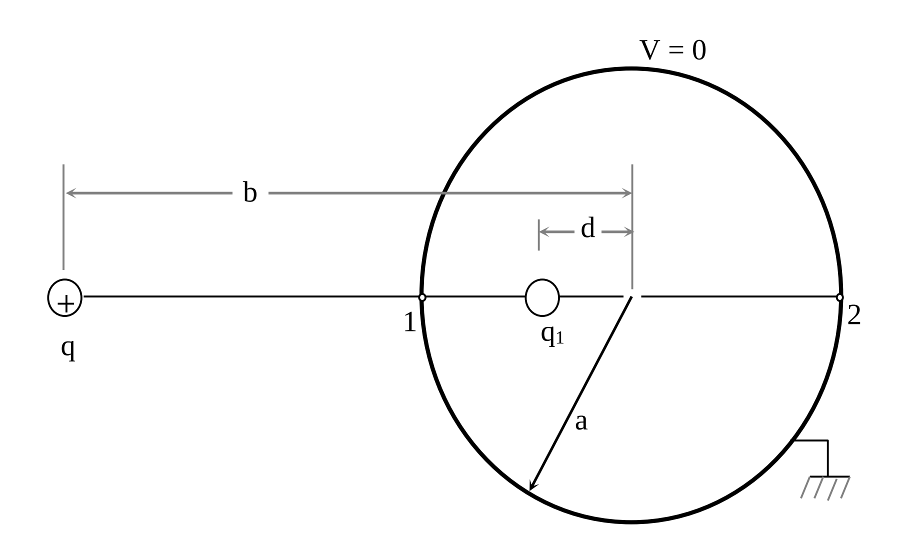
أو $\frac{q}{b-a} = -\frac{q_1}{a-d}$ ، ومن النقطة **(2)**

$$V_2 = 0 = \frac{q}{4\pi\varepsilon_0\,(b+a)} + \frac{q_1}{4\pi\varepsilon_0\,(a+d)}$$

أو $\frac{q}{b+a} = -\frac{q_1}{a+d}$ ، وبالتالي يمكن إيجاد **d** و **q1** كما يلي:-

$$d = \frac{a^2}{b} \quad m \qquad \textbf{(76a-1)}$$

$$q_1 = -\frac{qa}{b}\ \text{C} \qquad \textbf{(76b-1)}$$



الشكل (1-54):-شحنة q+ موضوعة أمام كرة موصلة مؤرضة وعلى بعد b من المركز وتم بيان المسألة المناظرة من خلال صورة الشحنة q وهي q1(غير معروف) ومكانها على بعد d (غير معروفة) من المركز.

المسائل:

إذا كان هناك ثلاث شحنات 1 n C و 2 n C و 3 n C موضوعة على المحور x عند النقاط التالية (0 ,0 ,1) و (0 ,0 ,2) و (0 ,0 ,3) على التوالي:-

أوجد المجال الكهربائي الناتج عن هذه الشحنات عند النقطة p(0 ,0 ,0) .

أوجد الجهد الكهربائي عند النقطة p.

أوجد النقطة التي يكون عندها المجال الكهربائي يساوي صفراً.

أوجد القوة المؤثرة على الشحنة 4 n C إذا كانت موضوعة عند النقطة (0 ,0 ,0) وإذا كانت موضوعة عند النقطة (0 ,0 ,4) من ترتيب الشحنات المشار إليها أعلاه.

تم ربط شحنتين متساويتين وشحنة كل منها تساوي q C بخيطين طول كل خيط L من نقطة واحدة. فإذا كان وزن كل شحنة m kg (أهمل وزن الخيطين) فأوجد الزاوية التي يشكلها الخيطان بين بعضهما عند الاستقرار.

إذا وضعت ست شحنات متساوية q C عند كل حافة من حواف مكعب طول ضلعه L m. أوجد القوة المؤثرة على كل شحنة من هذه الشحنات والقوة المؤثرة على شحنة q1 C الموضوعة في مركز المكعب.

وضع سلك ، طول L، مشحون بكثافة شحنة خطية $\rho_L \;\; C/m$ على المحور zمن النقطة (0, 0, 0) وحتى النقطة (0, 0, L). أوجد المجال الكهربائي E والجهد الكهربائي V عند النقطة (0, d, 0) أو عند النقطة (r, ϕ, 0).

إذا كانت هناك حلقة نصف قطرها aوكانت كثافة الشحنات الخطية عليها $\rho_L \;\; C/m$. وإذا كانت الحلقة موضوعة في المستوى xy ومركزها عند نقطة الأصل فأوجد المجال الكهربائي E والجهد الكهربائي V عند نقطةz على المحور (0, 0, z) وكذلك عند نقطة الأصل.

إذا كان هناك قرص نصف قطره a مشحون بكثافة شحنة سطحية $\rho_S \;\; C/m^2$ وموضوع في المستوى xy ومركزه عند نقطة الأصل. أوجد المجال الكهربائي E والجهد الكهربائي V عند النقطة (0, 0, z).

إذا كانت كثافة الشحنات الحجمية في وسط سماحيته $\varepsilon_0 \; F/m$ ومحدد بالكرة $r = a$ هي $\rho_0 \;\; C/m^3$ فأوجد المجال الكهربائي E وكثافة الفيض الكهربائي D والجهد الكهربائي V في كل مكان $0 \le r < \infty$.

إذا كانت كثافة الشحنات الحجمية في كرة نصف قطرها a وسماحيتها ε_o F/m هو $K r \; C/m^3$ ، فأوجد المجال الكهربائي Eوكثافة الفيض الكهربائي Dوالجهد الكهربائي V في كل مكان $0 \le r < \infty$.

إذا كـان هنـاك غلاف كروي موصل نصف قطره a وتم شحنـه بشحنـة كلية q C ووضع في الفراغ الحر فأوجد E و D و V في كل مكان $0 \le r < \infty$. كذلك أوجد مواسعة هذه الغلاف الكروي C.

إذا تم وضع الغلاف المشحون المشار إليه في المسألة1-9 في غلاف كروي موصـل وغيـر مشحون ونصف قطره b > a فأوجد E و D و V فـي كـل مكـان $0 \le r < \infty$. كذلك أوجد C لهذا الترتيب. أعد حل المسألة (1-10) عندما يتم تأريض الغلاف الكروي الخارجي.

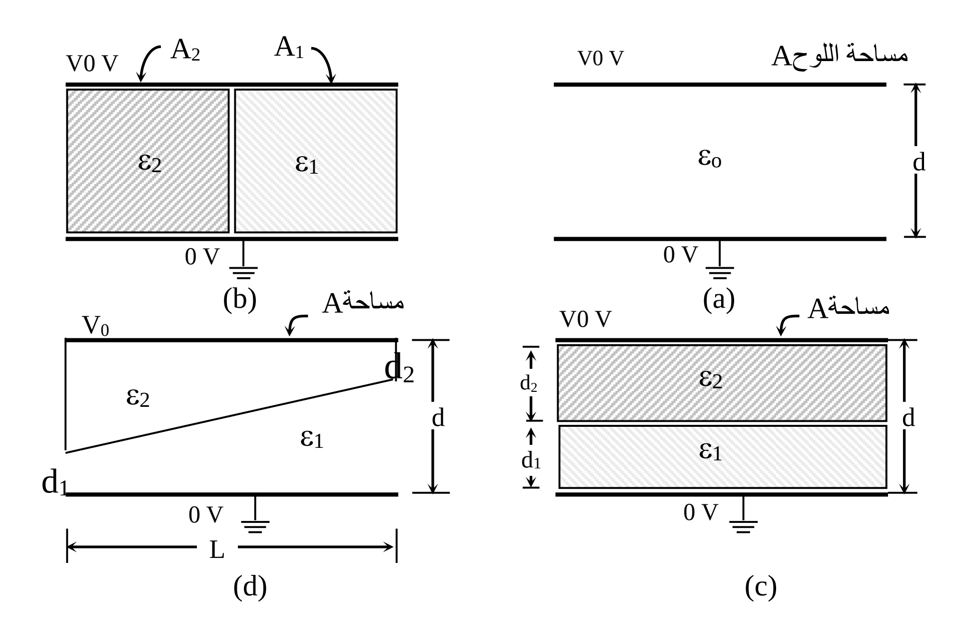
إذا كان هناك مواسع ذو اللوحين المتوازيين ومساحة كل لوح A m2 والمسافة بين اللوحين d وتم استخدام مادة (أو مواد عازلة) لفصل اللوحين عن بعضهما

وذلك كما هو مبين في الشكل (1-55) وذلك كما يلي(**a**):- استخدام الهواء (سماحية ε_0 F/m). (**b**) استخدام مادتين عازلتين يتم وضعهما جنباً إلى جنب. (**c**) استخدام مادتين عازلتين يتم وضعهما فوق بعضهما البعض. (**d**) استخدام مادتين عازلتين موضوعتان فوق بعضهما البعض بشكل انزلاقي كما هو مبين في الشكل.إذا كانت فولطية اللوح العلوي V_0 V وتم تأريض اللوح السفلي، فأوجد في كل حالة ما يلي:-

مواسعة هذا المواسع.

إيجاد كثافة الشحنات السطحية الحرة على كل لوح من لوحي المواسع.

إيجاد كثافة الشحنات السطحية المقيدة على كل سطح من أسطح المواد العازلة (الموازية لألواح المواسع) المذكور في البندين **b** و **c** أعلاه. (أهمل الانحناءات في خطوط المجال الكهربائي).



الشكل (1-55):-مواسع اللوحين المتوازيين (a) باستخدام الهواء كمادة عازلة (b) مادتين بجانب بعضهما (c) مادتين فوق بعضهما (d) مادتين منزلقتان فوق بعضهما.

في المسألة (1-10) إذا كانت شحنة الغلاف الداخلي 10 nC ونصف قطر الغلاف الخارجي b = 10 cm فأوجد أقل نصف قطر للغلاف الداخلي قبل أن يحدث انهيار للوسط بين الغلافين (الوسط هو الهواء ويحدث انهياره عندما يكون $E = 30\ K\ V / cm$)؛ أوجد كثافة الشحنات السطحية على كل من الغلافين في هذه الحالة.

إذا كان هناك كرتان موصلتان نصف قطر أحدهما a ونصف قطر الأخرى 10a فإذا وضعتا بعيداً عن بعضهما ووصلتا بسلك طويل ورفيع وموصل بحيث لا تتأثر الكرتان ببعضهما، وتم وضع شحنة مقدارا q C على أحد هاتين الكرتين فأوجد شحنة كل كرة وأوجد D على السطح الخارجي لكل كرة.

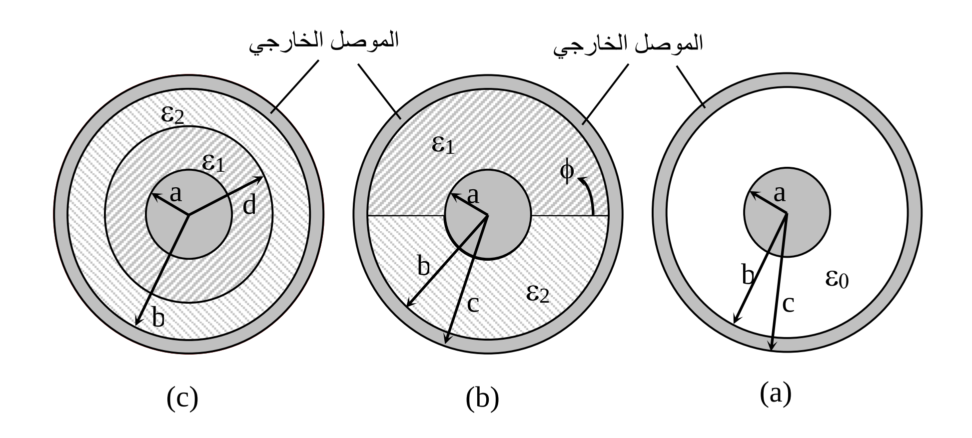
يبين الشكل (1-56) خط نقل طويل على شكل كابل محوري نصف قطر موصله الداخلي a ونصف قطر موصله الخارجي b و c حيث c > b فإذا كانت المادة (أو المواد) العازلة التي تفصل بين الموصلين هي

كما يلي (a):- الهواء (b) مادتين عازلتين الأولى بسماحية $\varepsilon_1 \ \ F/m$ للمدى $0 \le \phi < \pi$ والثانية $\varepsilon_2 \ \ F/m$ للمدى $\pi \le \phi < 2\pi$ (c) مادتين عازلتين الأولى بسماحية $\varepsilon_1 \ \ F/m$ للمدى $0 \le \rho < d$ والثانية بسماحية $\varepsilon_2 \ \ F/m$ للمدى $d \le \rho < b$. إذا كان جهد الموصل الداخلي $V_0 \ \ V$ وجهد الموصل الخارجي صفراً فأوجد:-

مواسعة هذا الكابل C لكل وحدة طول لكل واحدة من الترتيبات السابقة.

كثافة الشحنات الخطية الحرة على سطح الموصل الداخلي والخارجي.

إذا تم، في الفرعa أعلاه، تثبيت نصف قطر الموصل الخارجي فأوجد قيمة نصف قطر الموصل الداخلي التي تجعل قيمة المجال الكهربائي عند سطح الموصل الداخلي أدنى ما يمكن (فرق الجهد بين الموصل الداخلي والخارجي ثابتة وتساوي $V_0 \ \ V$).



الشكل (1-56):- الكابل المحوري بترتيبات مختلفة للوسط بين الموصلين (a) باستخدام الهواء (b) باستخدام مادتين عازلتين للمدى $0 \leq \phi < \pi$ و $\pi \leq \phi < 2\pi$ (c) باستخدام مادتين عازلتين للمدى $0 \leq \rho < d$ و $d \leq \rho \leq b$.

أوجد مقاومة التسريب، لكل وحدة طول، بين الموصل الداخلي والخارجي لكابل محوري نصف قطره الداخلي a ونصف قطر موصله الخارجي b علماً بأن الوسط العازل بين الموصلين له موصلية $\sigma_d \ (\Omega \, m)^{-1}$ (أهمل مقاومة الموصلين الداخلي والخارجي) .

أوجد المقاومة بين غلافين كرويين موصلين الداخلي بنصف قطر a والخارجي بنصف قطر b إذا كانت موصلية المادة العازلة بينهما هي $\sigma\,(\Omega\,m)^{-1}$.

أوجد مقاومة سلك موصل نصف قطره 1 mm لكل وحدة طول إذا كان مصنوعاً من المواد التالية:-

(a) نحاس وموصليته $\sigma = 5.7\times10^{7}\ (\Omega\,m)^{-1}$.

(b) ألومنيوم وموصليته $\sigma = 3.5\times10^{7}\ (\Omega\,m)^{-1}$.

(c) جرمانيوم وموصليته $\sigma = 2.3\,(\Omega\,m)^{-1}$

(d) مادة عازلة مثل الزجاج وموصليتها $\sigma = 10^{-12}\ (\Omega\,m)^{-1}$.

أوجد القوة لكل وحدة طول بين سلكين موصلين كل بنصف قطر a، صغير جداً ، يحملان تيارين متساويين ومتعاكسين ويسريان بنفس الاتجاه علماً بان المسافة بين الموصلين هي d ونفاذية الوسط هي $\mu_0\ \ H/m$.

أوجد المجال المغناطيسي H وكثافة الفيض المغناطيسي B الناتجة عن حلقة مستطيلة $a \times b$ يمر فيها تيار I A بعكس اتجاه دروان عقارب الساعة CCW ، علماً بأن هذه الحلقة موضوعة في المستوى x y ومركزها عند نقطة الأصل وذلك عند نقطة (0, 0, z) تقع على محور z.

إذا كانت كثافة التيار المار في موصل أسطواني طويل هي $J_z = \alpha \rho \quad A/m^2$ للمدى $0 \le \rho \le a$ في اتجاه محوره. أوجد المجال المغناطيسي H و B في كل مكان.

يسري تيار I A في مثلث متساوي الإضلاع طول ضلعه 2a أوجد H و B في مركزه.

أوجد المجال المغناطيسي H وكثافة الفيض المغناطيسي B في مركز الحلقات التالية

حلقة دائرية مساحتها A m2.

حلقة مربعة مساحتها A m2.

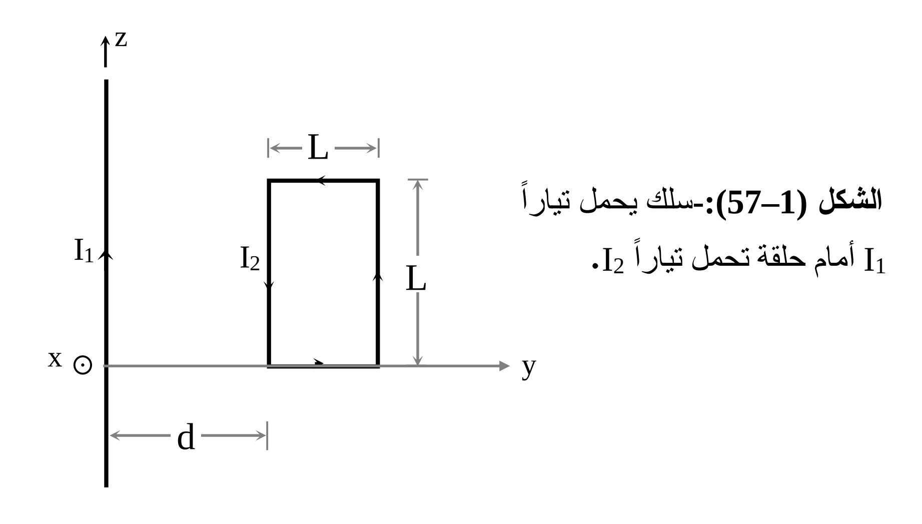
حلقة مستطيلة أطوال أضلاعه هي b و 2 b ومساحتها A m2. علماً بأن هذه الحلقات تحمل تياراً في اتجاه دوران عقارب الساعة CW مقداره I A.

يبين الشكل (1-57) سلك موصل طويل موضوع على طول المحور z ويحمل تياراً مقداره I1 A وتم وضع حلقة مستطيلة $(L_1 \times L_2)$ أمـام هذا السلك يمر فيها تيار مقداره I2 A ويبعد مركزها عن السلك مسافة $d + L_1/2$ وبالتالي أوجد:-

القوة ما بين السلك والحلقة.

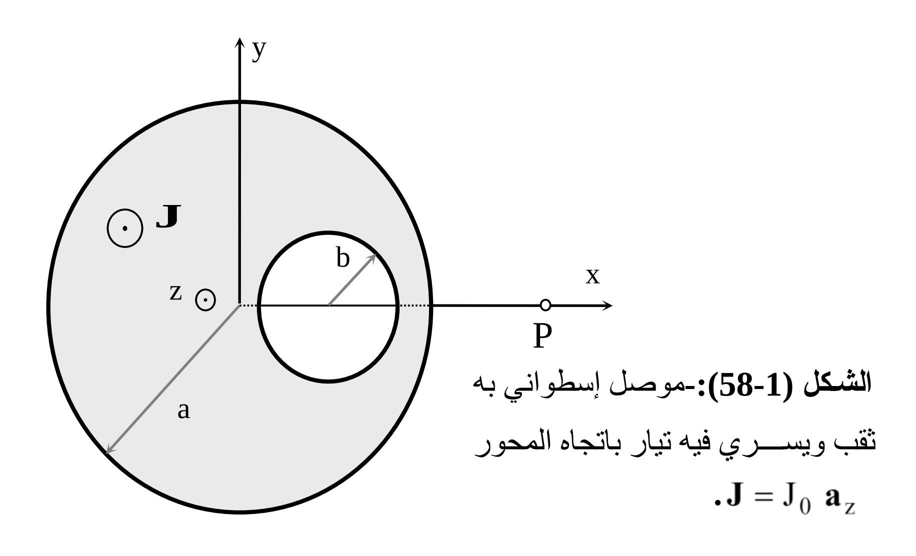
كمية الفيض المغناطيسي الناتج من التيار I1 والذي يمر في الحلقة المذكورة أعلاه.

الحاثية التبادلية L12 بين هاتين الدارتين.



الشكل (1–57):-سلك يحمل تياراً I_1 أمام حلقة تحمل تياراً I_2.

يبين الشكل (1-58) موصل أسطواني نصف قطره a وعمل به ثقب بعيداً عن محوره وموازياً لمحور الموصل بنصف قطر $b\ (< a)$. فإذا كانت كثافة التيار السطحي المار في هذا الموصل هو $J_z = J_0 \ \ A/m^2$. أوجد المجال المغناطيسي H وكثافة الفيض المغناطيسي B عند أي نقطة داخل الثقب وعند النقطة p.



الشكل (1-58):-موصل إسطواني به ثقب ويسـري فيه تيار باتجاه المحور $\mathbf{J} = J_0\ \mathbf{a}_z$.

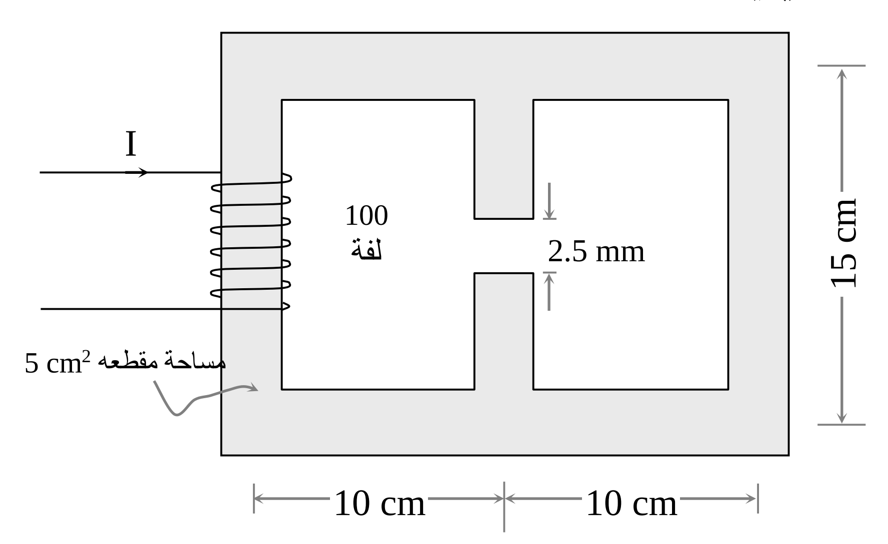
أوجد محاثة ملف حلزوني عدد لفاته 100 لفه ونصف قطره 10mm وطوله 60 cm علماً بأن قلبه من الهواء.

أوجـد محاثة ملف حلقي عدد لفاته 100 لفه ونصف قطر حلقته 10 cm ومساحة مقطعه 5 cm2 علماً بأن قلبه من مادة حديدية نفاذيتها النسبية $\mu_r = 1000$ **(لاحظ الفرق بين محاثة هذا الملف ومحاثة الملف الحلزوني).**

أوجد محاثة كابل محوري طويل لكل وحدة طول إذا كان نصف قطر موصله الداخلي a أما موصله الخارجي فإن نصف قطره الداخلي b ونصف قطره الخارجي c علماً بأن $c > b$ **. افترض أن نفاذية الموصلين والوسط الفاصل بينهما هي** $\mu_0 \quad H/m$.

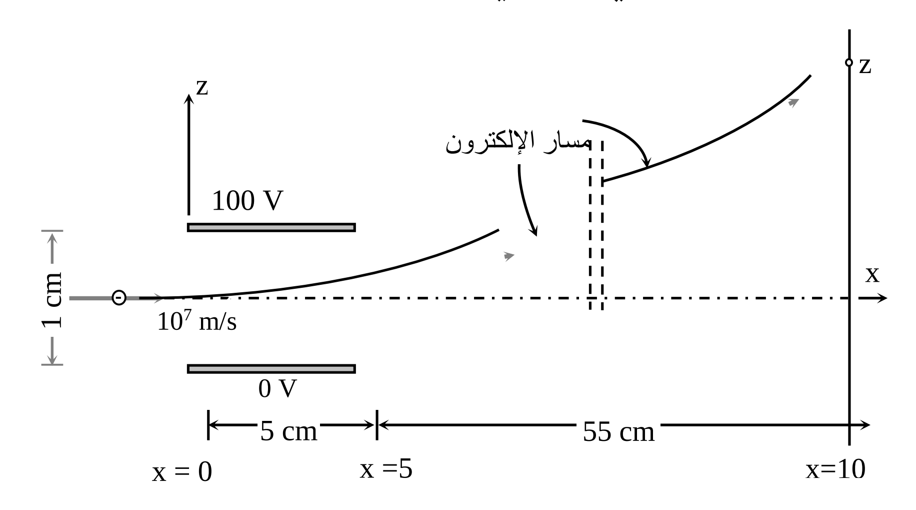
إذا كان هناك حلقتان موصلتان إحداهما بنصف قطر a موضوعة في المستوى xy ومركزها عند نقطة الأصل والثانية موضوعة موازية للمستوى xy ومركزها على محور z عند النقطة (0, 0, h) فإذا كان نصف قطر الحلقة الثانية b وكانت a > b وكذلك $h >> a$ **فأوجد المحادثة التبادلية بين هاتين الحلقتين.**

يبين الشكل (1-59) ملف عدد لفاته 100 لفه ملفوف على قلب حديدي مساحة مقطعه $5\ cm^2$ ونفاذيته $\mu = 1000\ \mu_0\ \ H/m$ وبه فجوة هوائية طولها $2.5\ \ mm$. أوجد التيار I اللازم لإنتاج كثافة فيض مغناطيسي مقدارها $0.5\ \ Wb/m^2$ في هذه الفجوة. أهمل انحراف خطوط المجال المغناطيسي في الفجوة.



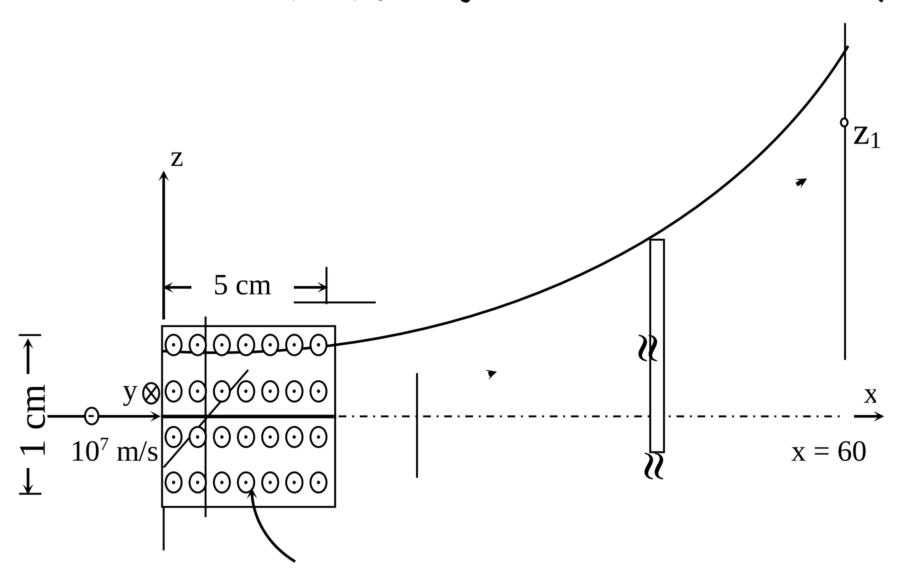
الشكل (1-59):-ملف عدد لفاته 100 لفه حول قلب حديدي به فجوة حديدية.

إذا دخل إلكترون بسرعة ابتدائية مقدارها $\mathbf{v}_0 = 10^7\ \mathbf{a}_x\ \text{m/s}$ **بين لوحي مواسع فرق الجهد بين لوحيه هو** $100\ \text{V}$ **كما هو مبين في الشكل (1-60). فإذا كان لوحا المواسع على شكل مربع** $5\,\text{cm} \times 5\,\text{cm}$ **وكانت المسافة بين اللوحين** $1\,\text{cm}$ **فحدد مسار هذا الإلكترون وبالتالي انحرافه في اتجاه z عند النقطة** $x = 60\ \text{cm}$.



الشكل (1-60):-دخول إلكترون بسرعة ابتدائية $v_0 \ \mathbf{a}_x$ في مجال كهربائي محدد بين لوحي مواسع.

في المسألة السابقة إذا تم استبدال المواسع بملفين ينتجان كثافة فيض مغناطيسي $B_y = 1 \ \text{mWb/m}^2$ فأوجد مسار الإلكترون في هذه الحالة وحدد انحرافه في اتجاه z عند النقطة $x = 60 \text{ cm}$، أنظر الشكل (1-61).

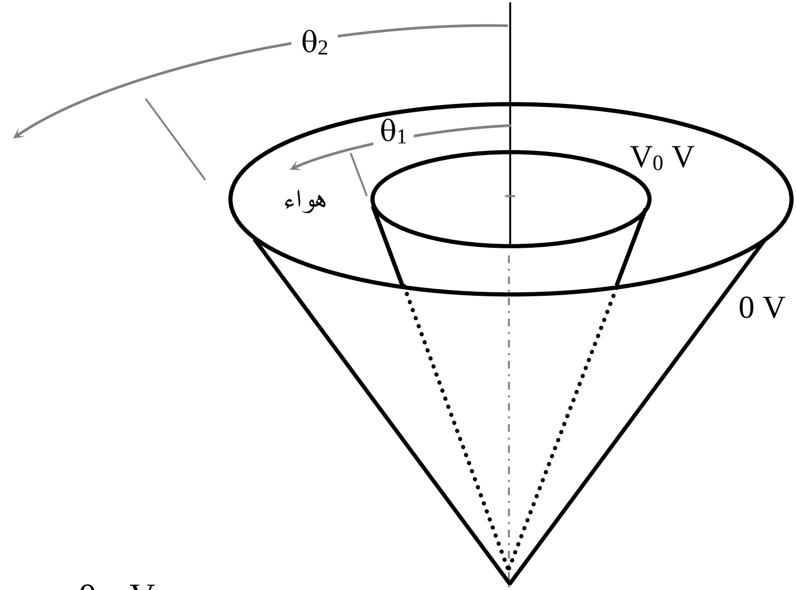


x=0 cm $\mathbf{B} = -1\mathbf{a_y}$ mWb/m^2

الشكل (1-61):-دخول إلكترون بسرعة ابتدائية مقدارها $\mathbf{v}_0 = 10^7\ \mathbf{a}_x \quad m/s$ في مجال مغناطيسي كثافة فيضه $\mathbf{B} = 1\,\mathbf{a}_y\ mWb/m^2$.

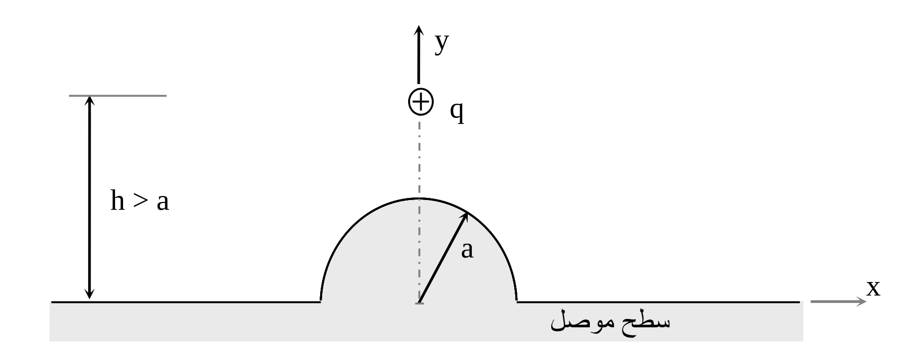
إذا وضع سلك موصل رفيع ومشحون بكثافة شحنة خطية $\rho_L \quad C/m$ على ارتفاع **h** من سطح موصل جيد التوصيل فأوجد المجال الكهربائي **E** والجهد **V** في كل مكان.

يبين الشكل (1-62) غلافين مخروطين موصلين، فإذا كانت زاوية الداخلي θ_1 و زاوية الخارجي θ_2 $(\theta_2 > \theta_1)$ وكان جهد الخارجي صفراً والداخلي $V_0 \ V$ فأوجد المجال الكهربائي **E** والجهد **V** بين هذين الغلافين (افترض أن الغلافين يمتدان إلى ما لانهاية).



الشكل (62-1):-غلافان مخروطان موصلان غير متصلين جهد أحدهما $0 \quad V$ **والآخر** $V_0 \quad V$.

يبين الشكل (63-1) شحنة موجبة q+ موضوعة أمام سطح موصل به جزء مستوٍ وآخر كروي أوجد المجال الكهربائي E والجهد الكهربائي في كل مكان في المستوى x y .



الشكل (1-62):-شحنة موجبة q + أمام سطح موصل به جزء مستوٍ وآخر كروي.

الفصل الرابع

نبذة عن المواد فائقة التوصيل المواد فائقة التوصيل :

أولا - ظاهرة الموصلية الفائقة :

Phenomena of superconductivity

من المعلوم أن المقاومة الكهربية للجوامد تنشأ أثر حيود البلورات الحقيقية عن سلوك الشبيكة البلورية المثالية للمواد والتي تساعد علي تشتت الإلكترونات أثناء عملية التوصيل الكهربي مما يؤدي إلي فقد جزء كبير من الطاقة الكهربية علي شكل حرارة . ولذلك فقد كان الاعتقاد السائد هو استحالة انعدام المقاومة الكهربية (الموصلية الكهربية تساوي مالا نهائية) لتلك البلورات مع انخفاض درجة الحرارة حتى عند الصفر المطلق نظرا لعدم إمكانية تحضير بلورات مثالية تكون خالية تماما من العيوب البلورية . علاوة علي ذلك فإن تشتت الإلكترونات علي بعضها البعض ينشيء هو الآخر قدراً ملموسا من المقاومة الكهربية حتى في إهمال تشتت الإلكترونات علي الفونونات وعيوب الشبيكة البلورية . الجدير بالذكر أن المقاومة الكهربية للمواد وحتى نهاية القرن الثامن عشر كانت تقاس حتى درجات حرارة منخفضة والتي كانت درجة حرارة النتروجين السائل 77 درجة مطلقة

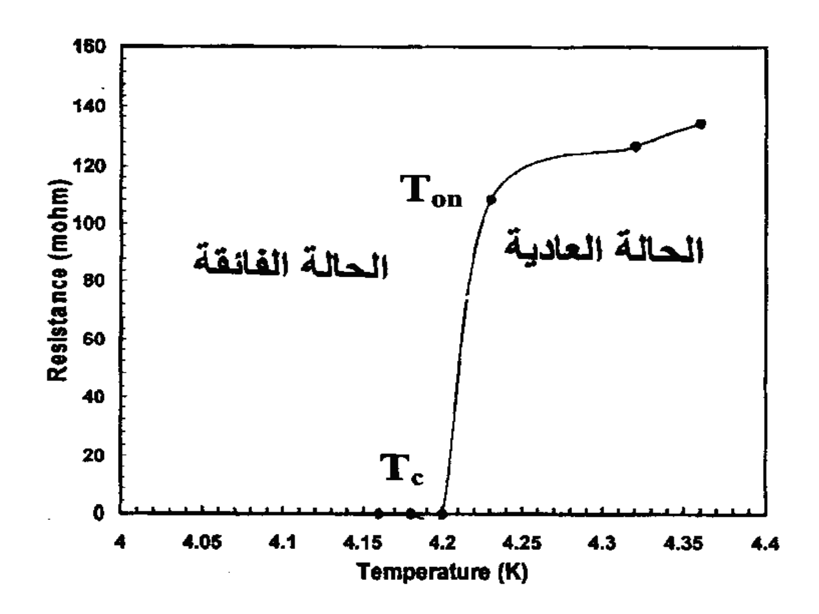
(أي ما يعادل 196درجة تحت الصفر المئوي) . لكن مع بداية القرن التاسع عشر تمكن الباحثين من الحصول علي الهليوم السائل والذي وصلت درجة حرارته إلي 4.2 درجة مطلقة (أي ما يعادل 268.8درجة تحت الصفر المئوي) . وبالتالي تمكن الباحثين من قياس المقاومة الكهربية للمواد عند درجات حرارة منخفضة حتى هذه الدرجة .

في عام 1911بينما كان العالم الهولندي هيك كامرلين أونيس يقوم بقياس المقاومة الكهربية للزئبق النقي عند درجة حرارة الهليوم السائل وجد أن المقاومة الكهربية للزئبق تنهار وتؤول إلى أقل من 0.00001 أوم (الصفر تقريبا) كما يتضح في شكل (1). ولذا أطلق أونيس علي هذه الظاهرة بالموصلية الفائقة لأن التوصيل الكهربي يصل للما لانهاية عند هذه الدرجة . كما أطلق علي درجة الحرارة التي تتحول عندها المادة من الحالة العادية إلي الحالة الفائقة بدرجة الحرارة الحرجة Tc . بينما درجة الحرارة التي تبدأ عندها المقاومة الكهربية في الانخفاض المفاجئ سميت بدرجة حرارة التحول Tonكما يعرف الفرق بين درجة الحرارة الحرجة ودرجة حرارة البداية بعرض الانتقال .

العالم الهولندي أونيس:

أما سلوك المقاومة الكهربية خلال المنطقة من درجة حرارة الغرفة وحتى درجة حرارة التحول يسمي بالحالة العادية نظرا لأن المادة تسلك سلوك الموصلات حيث تزداد المقاومة مع زيادة درجة الحرارة . بينما يعرف سلوك المادة عند درجة حرارة أقل من أو تساوي الدرجة الحرجة بالحالة الفائقة حيث تنعدم المقاومة الكهربية للمادة تماما في تلك المنطقة .

وبالطبع كان أونيس أول عالم أكتشف هذه الظاهرة وقد حصل علي جائزة نوبل عن استحقاق لهذا الإنجاز العظيم في عام 1913 .

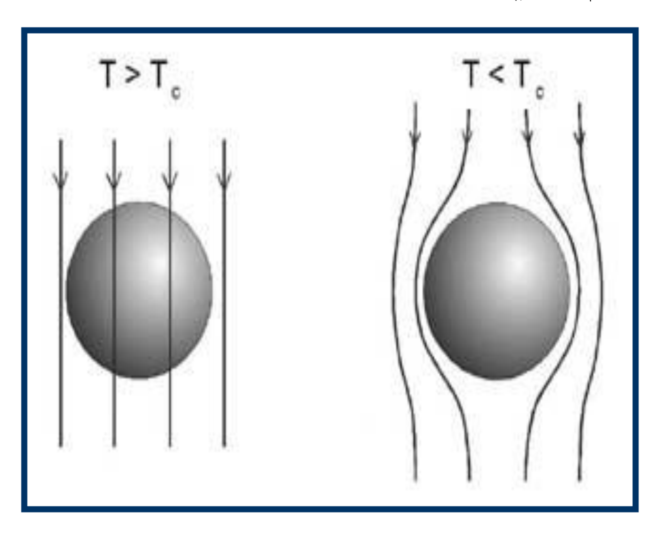


شكل (1) : سلوك المقاومة الكهربية مع درجة الحرارة للزئبق فائق التوصيل

علي الجانب الأخر فإنه في عام 1933 وجد العالمان الألمان ميز نر و أوشنفيلد أن المواد فائقة التوصيل تطرد المجال المغناطيسي المطبق عليها إلي الخارج و ذلك عند تبريدها حتى درجة الحرارة الحرجة وفي وجود المجال المغناطيسي كما يتضح في شكل (2) . ونظراً لحدوث هذه الظاهرة فقد صنف ميزنر وأوشنفيلد المواد الفائقة علي أنها من عائلة المواد الدايا مغناطيسية. ويختلف هذا السلوك تماما مع ما يحدث في الموصلات حيث تنشأ تيارات تأثيرية عند وضعها في المجال المغناطيسي

ولكن سرعان ما يزول هذا التيار أثر المقاومة الكهربية للمادة ويستطيع المجال اختراق المادة. لكن في المواد فائقة التوصيل فإن هذه التيارات التأثيرية تكون دائمة ولا تنعدم نظرا لانعدام المقاومة الكهربية لتلك المواد مما يساعد في إنتاج عزوم مغناطيسية تعاكس المجال المغناطيسي الخارجي فتمنعه من اختراقها. وقد سميت هذه الظاهرة بتأثير ميزنر نسبة إلى العالم ميزنر. هذا وقد وجد أن القابلية المغناطيسية للمادة الفائقة تساوي سالب الواحد الصحيح مما يؤكد على أن المادة الفائقة تولد عزم مغناطيسي مضاد ومساو للمجال المغناطيسي الخارجي وبالتالي لا يستطيع المجال اختراقها كما هو الحال في المواد الدايا مغناطيسية .

العالم الألماني ميز نر:



شكل (2) : سلوك المجال المغناطيسي للمواد في الحالة العادية والحالة الفائقة

ثانيا- ظاهرة الطفو : Floating phenomena

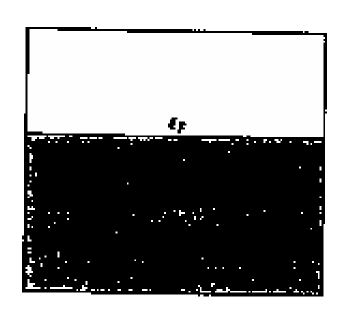
من المعلوم أن الموصل الفائق هو موصل تام التوصيل و تنعدم مقاومته الكهربية عند درجة الحرارة الحرجة. ولذا فإننا إذا أدخلنا تياراً كهربياً في حلقة من سلك فائق التوصيل فإن هذا التيار سوف يستمر في السريان إلى ما شاء الله طالما أن السلك يظل محتفظاً بموصلتيه الفائقة. في احدي التجارب استمر سريان التيار بدون انقطاع في حلقة من سلك فائق التوصيل لمدة عامين ونصف دون أي نقص في شدته و دون تغذية الحلقة بأي مصدر كهربي خارجي. و لقد تم تسمية التيارات التي لا تجد أية مقاومة لسريانه في موصل فائق بالتيارات الدائمة والتي تحدث عند مجالات مغناطيسية متغيرة مما ينشأ ظاهرة الطفو المثيرة الموضحة بالشكل (3) . عند وضع مغناطيس صغير فوق موصل فائق فإن المجال المغناطيسي علي سطح الموصل الفائق يسبب تيارات دائمة تُنشئ قوي تنافر مع المغناطيس بحيث تقوي وتشتد كثيراً باقتراب المغناطيس من الموصل الفائق حتى يتم رفع المغناطيس في الهواء فيظهر وكأنه عائم في الهواء.

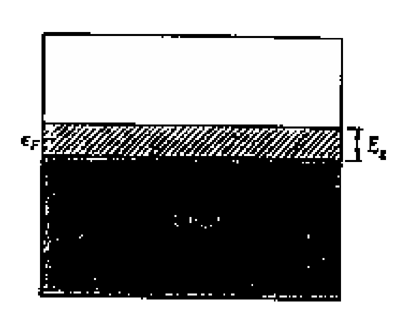


شكل (3) : ظاهرة الطفو في المواد فائقة التوصيل

ثالثا - طاقة الفجوة :Energy gap

في الموصلات تنعدم تقريبا طاقة الفجوة ويكون شريط التكافؤ ملاصق لشريط التوصيل . ولقد كان المعتقد عدم وجود طاقة فجوة في المواد فائقة التوصيل كما هو الحال في الموصلات. ولكن تبين العكس ووجد أن هناك طاقة فجوة تنشأ من خلال التفاعل بين الإلكترونات[4,5] لتكوين ما يسمي بأزواج كوبر مما يتسبب في وضع الإلكترون في مستوي فارغ بالنسبة لموضعه في مستوي فيرمي للغازاتكما يتضح في شكل (4) .





شكل (4) : شريط التوصيل للحالة العادية و طاقة الفجوة للحالة الفائقة

رابعا - أزواج كوبر : Cooper Pair

في 1957حدث تقدم ملحوظ في علم الموصلية الفائقة بواسطة الفيزيائيين الأمريكان Bardeen, Cooper and Schrieffer Theory (BCS) [6] . هؤلاء العلماء الثلاثة أرسوا نظرية BCS للموصلية الفائقة للمواد عند درجات الحرارة القريبة من الصفر المطلق . لقد وجدت النظرية حلاً يفسر ميكانيكية التوصيل الكهربي في المواد الفائقة والتي تبنى على فكرة أزواج كوبر نسبة إلى العالم كوبر أحد مؤسسي النظرية .



باردين-كوبر- شريفر

لقد أشارت النظرية إلي أن هناك قوي ترابط تنشأ بين الإلكترونات في المواد فائقة التوصيل بخلاف ما تمليه النظرية الكلاسيكية من وجود قوي التنافر لكولوم بين الإلكترونات سالبة الشحنة بحيث يحدث تجاذب بين الإلكترون ونظيره لتكوين ما يسمي بأزواج كوبر. هذه العملية تحدث نتيجة تفاعل الإلكترون مع الشبيكة البلورية والتي تعمل علي جعل أحد الإلكترونات كما لو كان محاط بحاجز من الشحنات الموجبة بحيث تكون أكبر بكثير من الشحنات السالبة التي يمتلكها الإلكترون الثاني . وبذلك تطغي قوي التجاذب علي قوي التنافر مما يؤدي إلي تقارب الإلكترونين من بعضهما مكونين أزواج كوبر .

خامسا- المواد الفائقة ذو الحرارة العالية :

High Tc superconductors

جدول (1) يوضح أهم أنظمة المواد فائقة التوصيل التي تم التوصل إليها منذ اكتشافها حتى الآن وكذلك درجة الحرارة الحرجة لكل نظام .

جدول (1) : أنظمة المواد فائقة التوصيل ذو الحرارة العالية

الدرجة الحرجة بالكلفن	النظام	أسم المكتشف	سنة الاكتشاف
35 38	La2-xBaxCuO4 La2-xSrxCuO4 (La: 214)	Bednorzand Muller [7] M.Tarascon et.al. [8]	1986 1987
90	YBa2Cu3O7 (Y: 123)	M.K.Wu et.al. [9]	1987
110	Bi2Sr2Ca2Cu3O10 (Bi: 2223)	M.Maeda et.al. [10]	1988
127	TI2Ba2Ca2Cu3O8 (TI: 2223)	Z.Z. Sheng et.al. [11]	1989

134	HgBa2Ca2Cu3O8 (Hg: 1223)	A. Shilling et.al. [12]	1993
164	(Hg:1223) under pressure	B.A. Hunter et.al. [13]	1994
39	Mg B2	J.Akimitsu et.al. [14]	2001

سادسا- تطبيقات المواد فائقة التوصيل :

Superconducting application

للمواد فائقة التوصيل تطبيقات عديدة سوف نذكر البعض منها كالتالي:

جهاز سكويد :

يتركب جهاز سكويد لقياس شدة التمغنط من حلقة من الموصل الفائق مكونة من وصلتين من المواد فائقة التوصيل تسمي وصلات جوزيف صن . يتمكن جهاز سكويد من رصد التغير في الفيض المغناطيسي في ضوء الجهد المتردد الناتج أثر التغير في الطور بين أزواج كوبر عبر الوصلتين .

ويتميز جهاز سكويد بحساسية عالية جدا لقياس الفيض المغناطيسي تصل إلى حوالي 14-10 تسلا . هذه المجالات تعتبر أقل من المجال المغناطيسي للأرض بمقدار 1011 مرة علي الأقل . وبالتالي فقد أستطاع الباحثين من استخدام جهاز سكويد في رصد المجالات المغناطيسية الناتجة عن أعضاء جسم الإنسان مثل القلب والمخ والجهاز العصبي والتي كان من الصعب رصدها بالأجهزة المعتادة حيث أنها كانت تتطلب حساسية عالية جدا في القياس نظرا لأن المجال المغناطيسي الناتج عن هذه الأعضاء يكون محدود جدا ويحتاج لدقة وحساسية عالية في القياس . على سبيل المثال المجال المغناطيسي للقلب يكون في حدود10-10 تسلاو عن المخ يكون في حدود 13-10تسلا .

أجهزة الميكروويف Microwaves :

تتميز المواد الفائقة بصغر قيم المقاومة الكهربية عند درجات حرارة الغرفة . من المعلوم أيضا أنة يحدث فقد في شدة الميكروويف بالقرب من سطوح المواد نظرا للمقاومة الكهربية والتي تضعف من شدة الميكروويف بالقرب من سطوح تلك المواد . بمقارنة المقاومة النوعية للمواد الفائقة مع نظيرتها في المعادن عند الترددات العالية للميكروويف

وجد أن مقاومة المواد الفائقة تكون أقل بكثير من المعادن مثل النحاس . وبالتالي فإنه يمكن طلاء أسطح أجهزة الميكروويف بمواد فائقة التوصيل لتلاشي الفقد في شدة الميكروويف عند الترددات العالية .

كابلات القدرة : Power cables

لقد وجد أن المواد الفائقة تتحمل تيارات كهربية عالية مما أدي إلي تصنيع كابلات من المواد الفائقة بحيث تتمكن هذه الكابلات من حمل تيارات كهربية تصل إلي خمسة أضعاف ما يتحمله كابل من النحاس بنفس الأبعاد والمواصفات . وبالتالي تتمكن هذه الكابلات من نقل الطاقة من مكان لأخر بدون أي فقد يذكر مما سوف يساهم في نقل خطوط الطاقة بين الدول المختلفة إذا ما توفر الدعم اللازم لذلك .

المغناطيس الفائق :Superconducting magnets

تستخدم المواد فائقة التوصيل في تصميم المغناطيس الفائق بحيث يتم تبريد المغناطيس الفائق في الهليوم السائل بحيث تكون المقاومة الكهربية للملفات مساوية للصفر مما يجعل الطاقة المفقودة مساوية للصفر حتى عن تسخين الأسلاك . ومن هنا فإن مصدر تيار منخفض يكون مناسب لمرور التيار بشرط المحافظة على درجة حرارة الهليوم السائل . وبالتالي فإنه يمكن الحصول علي مجالات مغناطيسية تفوق المغناطيس المصنوع من الموصلات بعشرات المرات ..

أجهزة الرادار : Radar apparatus

لتصور هذه المشكلة يمكنك مراقبة ما يحدث لجهاز التلفاز عندما يتم تشغيل جهاز كهربائي بالقرب منة . إن الصورة سوف تصاب بالتشويش نتيجة المجالات المغناطيسية المجاورة والتي تؤثر على حركة الإلكترونات المسئولة عن تكوين الصورة . وهذا بالفعل ما يحدث مع أجهزة الرادار بالضبط ولكنها تكون أكثر حساسية حيث تتأثر بالمجالات الخارجية . وللتغلب علي ذلك تم استعمال الدروع المغناطيسية والتي هي عبارة عن اسطوانات ذات مقاسات مختلفة مصنوعة من المواد الفائقة يوضع بداخلها مصدر الإلكترونات فيحميها من المجالات الخارجية ويجعل صورة الرادار غاية في الوضوح .

القطار الفائق : Superconducting train

بنيت فكرة تصميم هذه القطارات علي ظاهرة الطرد المغناطيسي بحيث تطفو أو تعوم عجلات القطارات المصنوعة من المواد فائقة التوصيل علي مغناطيس فائق شديد . وبالتالي ينعدم الاحتكاك بين عجلات القطارات والقضبان مما يساعد في زيادة سرعة القطارات ولذا سميت بالقطارات العائمة أو الفائقة . وقد كان الاختبار الحقيقي عام 1986

حيث تم اختبار قطار فائق مكون من ثلاث عربات حيث وصلت سرعته إلي 352.4 (Km/h) . ولقد تم البدء في تنفيذ ذلك تجاريا عام 1990 في مشروع قومي مدعم في اليابان أطلقوا علية Maglev . ولقد تمكنت وزارة النقل من تبني الفكرة وتم افتتاح أول خط سكة حديد من المواد الفائقة واختبارها في إبريل 1997 . في نفس العام ديسمبر 1997 تم تنفيذ عجلات قطار من المغناطيس الفائق أطلقوا عليها MLX01 حيث يتكون القطار من ثلاث عربات سجلت سرعة قدرها (Km/h) 531 . وفي شهر مارس من عام 1999 تم تصنيع قطار فائق مكون من خمس عربات حيث وصلت سرعته (Km/h) 548 وفي ديسمبر 2003 وصلت سرعة القطار الفائق إلي (Km/h) 581 . في سول بكوريا الجنوبية هناك قطار فائق سرعته (Km/h) 300 وسوف تصل سرعته في 2008 إلي (Km/h) 412 . هذا القطار طوله 388 m ووزنه771 طن ويحتوي علي 18 عربة ويسع 935 راكب [18].

سابعا- تطلعات ومعوقات المواد الفائقة :

بالرغم من هذا النجاح الباهر في مجال الموصلية الفائقة إلاّ أنه ما زالت هناك مشكلات عديدة تتعلق بالمواد الفائقة مثل صعوبة تشكيل هذه المواد في صورة أسلاك أو دوائر كهربية بحيث يمكنها حمل تيارات كهربية عالية غير مسموح بها في الموصلات العادية .

ولذا فإن البحث جاري على قدم وساق للحصول علي مواد فائقة عند درجة حرارة الغرفة وفي الوقت ذاته تكون قابلة للتشكل بحيث يمكن بناء أجهزة تدخل في تصميمها دوائر كهربية من المواد الفائقة دون خشية الآثار السلبية المترتبة عن ارتفاع درجة الحرارة أو غير ذلك من آثار تزول بفعل استخدام هذه المواد . إضافة إلي ذلك فإنها سوف تساهم في توليد مجالات مغناطيسية قوية جدا تكون قادرة علي احتواء بلازما الاندماج النووي ذو الحرارة العالية والتي من الصعب حتى الآن إيجاد مواد تتحمل هذه الحرارة العالية . علي الجانب الأخر فإنه يمكن توظيف هذه المجالات المغناطيسية في تطوير أجهزة التشخيص الطبي بالرنين النووي المغناطيسي والتي تمكننا من الحصول علي صور تشريحية مفصلة ودقيقة لأي عضو من أعضاء جسم الإنسان . علاوة علي ذلك فإنه يمكن استخدامها في تطوير وسائل النقل مثل بناء القطارات العائمة بدون تكاليف باهظة مثلما يحدث الآن . بالفعل سوف يكون حدث علمي غير مسبوق ويفوق الوصف والخيال .

إن التقدم يجري ببطء ولكن تتحقق نسبة من النجاح كل فترة إلاَّ أن غاية الطموح المتمثلة في الحصول علي تركيبية تتحقق فيها الموصلية الفائقة عند درجة حرارة الغرفة لم تتحقق بعد . لكن عندما يتحقق هذا الهدف سوف تدخل الصناعة المعاصرة ثورة تكنولوجية جديدة لم يشهدها التاريخ من قبل وتكون الموصلية الفائقة يوم ذاك هي العمود الفقري للتكنولوجيا الجديدة في جميع المجالات . ولكن المطلوب الآن هو توفير الوسائل الضرورية التي تمكن الباحثين من تصنيع هذه المواد وتشكيلها بالكيفية المطلوبة فقد تكون تلك المواد في صورة أسلاك أو كابلات وقد تدخل في تركيب الشرائح الإلكترونية وقد تكون جزءاً رئيسياً من أجزاء محرك الطائرة وغير ذلك .

الفصل الخامس
الضوء

تعريف الضوء : هو ذلك الإشعاع الذي يؤثر على العين ويسبب الرؤية وقد مر هذا التعريف بمراحل تاريخية متعددة إلى أن أصبح بصيغة هذه وهو تعريف طبيعي لا يتدخل في التفاصيل الدقيقة أو الطبيعية لضوء .

ولكن التعريف الدقيق لضوء أو التعريف العلمي لضوء هو (أن الضوء عبارة عن موجات كهرومغناطيسية لها طاقه تظهر على شكل صورة إشعاعية وتتحول هذه الطاقة الإشعاعية إلى الأنواع الأخرى المعروفة من الطاقة تحقيقاً لمبدأ حفظ الطاقة (الطاقة لا تفنى ولا تستحدث من العدم).

طبيعة الضوء وانتشاره :

ينتشر الضوء في جميع الاتجهات وبسرعة فائقة جداً لدرجة لا يوجد في حياتنا اليومية أي شيء يدعونا للقول أنه يتحرك أسرع من الضوء يكون انتشار الضوء في خطوط مستقيمة لذلك فان لكل جسيم معين هناك ظل عند سقوط الضوء عليه أو على أي شي يصدر منه - كما سنلاحظ ذلك لاحقاً - لذلك يمكن القول بأن انتشار الضوء بخطوط مستقيمة هو مبدأعلمي يتحقق من مشاهدة الظل وكذلك فإن تكون الضوء بالكاميرات هو تطبيق أو تحقيق آخر لهذا المبدأ.

تختلف حساسية العين باختلاف الطاقة الإشعاعية المستقبلة من الأجسام المضيئة أو المرئية والعين قادرة على التمييز بين الألوان المختلفة المكونة لضوء العادي ضوء الشمس المرئي الواصل لسطح الأرض حيث لكل لون خواص مختلفة عن اللون الآخر حيث تقع حد حساسية العين في التمييز أو الرؤية للألوان أي للموجات الضوئية بين الضوء الذي طول موجته (A4000) وإلى (A7000) أي هاتين القيمتين هما حدود الإحساس بالرؤية.

لكن للعين ايضاً أن تكشف ضوء بطول موجة خارج عن هذه الحدود إذا كانت شدة الضوء عالية لدرجة كافية وتستخدم الألواح الفوتوغرافية والكاشفات الالكترونية الحساسة للكشف عن الإشعاع بدلاً عن العين البشرية وخاصة خارج الحدود المذكورة (A7000-4000) هذه الحدود تعرف بحدود الضوء المرئي (visible light). وحسب تعريفنا السابق للضوء فيمكن أن نعطي تعريف حسب طبيعة الضوء واستناداً (إلى النظريات) بأنه عبارة عن اضطراب كهرومغناطيسي ينتشر على هيئة موجات مستعرضة وتتميز الموجة عامة بالعوامل التالية :

سعة الموجة (a) بالمتر.

طول الموجة (λ) بالمتر.

سرعة الموجة (υ) متر/ثانية.

التردد (f) بالهرتز أي دورة/ثانية.

العدد الموجي(k) أي عدد الموجات لكل وحدة طول والذي يساوي (λ /Π2)

(متر)^(-1).

السرعة الزاوية(ω) والذي يساوي (ω=2Πf).

العلاقة الخاصة بسرعة الموجات تعطى كالتالي (υ=λ.f).

وفي علم البصريات والموجات تقاس الأطوال بوحدات صغيرة جداً والمستخدم هو الميكرومتر والمللي مايكرومتر أو النانومتر او الانجسترون حيث :

A=10^(-10) meter1

μ=10^(-6) meter1

mμ=1nm=10^(-9) meter1

فمثلاً طول الموجة الضوء الأصفر هي (A5890) وهي ضمن حدود حد الرؤيا (A-7000A4000) ومنبع الضوء حولنا هي الشمس وهذا لا يعني أن الشمس فقط هي مصدر الضوء الوحيد فمثلاً نحصل على الضوء من الكهرباء ومن المصابيح الزيتية مثل مصابيح الإنارة.

سرعة الضوء :

كان الفلكيون يعتقدون أن الضوء ينتقل بسرعة لانهائية كما كان يُعتقد أن أي حدث يحدث في أي مكان في الكون يلاحظ في جميع النقاط الأخرى في الكون في الوقت ذاته.

ويُقال أن جاليلو قد حاول أن يقيس سرعة الضوء عام 1600م ولكنة لم ينجح في تلك الفترة إلا بعد محاولات متعددة وأقتنع أن سرعة الضوء لانهائية أي لا يوجد شي أسرع من الضوء.

ولكن في عام 1849م نجح العالم فيزو بإعطاء قيمة مطلقة لسرعة الضوء على كوكب الأرض وهي(exp8 m/s2.9999) أما في الفضاء فان سرعة الضوء المطلقة هي (exp8 m/s3) أما هذا الفرق البسيط لا قيمة له في الحسابات لأنة يساوي فقط (m/s 87000) أما في الأوساط المادية فينتقل بسرعة معتمدة على خواص الوسط حيث نستطيع وضع معادلة بين سرعة الضوء بالوسط (v) وسرعة الضوء في الفراغ ©

حيث (v=c)= (c/n (1/2)^(Ɛ.μ)

حيث (v) سرعة الضوء في الوسط المادي.

و© سرعة الضوء في الفراغ وهي تساوي (exp8 m/s3).

و(ε) معامل السماحية الكهربائيه أي (معامل سماح المجال الكهربائي للوسط).

و(μ) معامل النفاذيه المغناطيسية أي (معامل النفاذ للمجال المغناطيسي للوسط).

و $n=(c/v)$ معامل الانكسار للوسط حيث يمثل النسبة سرعة الضوء بالفراغ وسرعة الضوء في الوسط أو ($n^2= \varepsilon.\mu$) لذلك قيمته دائماً اكبر من الواحد.

سرعة الضوء في الماء هي ثلاثة أرباع سرعة الضوء في الفراغ.

سرعة الضوء بالزجاج هي ثلثي سرعة الضوء في الفراغ.

نظريات تفسر سلوك الضوء :

ظهرت عدة نظريات لتفسير ظواهر الضوء عند اصطدامه أو إختراقه أو امتصاصه في الأوساط منها :

نظرية الدقائق لنيوتن.

نظرية ماكسويل للموجات الكهرومغناطيسية.

نظرية اينشتاين للفوتون.

النظرية الموجية الكمية.

لقد كان يُعـتقد حتى نهاية القرن الثامن عشر بأن الضوء شبيه بالصوت ويحتاج إلى وسط مادي حتى ينتقل ويسمى هذا الوسط بالأثير الذي كان يعرفه العلماء بأنة مادة رقيقة جداً ذات كثافة متناهية في الصغر وذلك لتبرير إن الأثير لا يمكن ملاحظته ولكن تجربة (ميكلسون- مورلي) اثبت إن الأثير غير موجود.

ففي عام 1905م وضع اينشتاين فرضاً لحل هذه المشكلة والفرض يقول :(إذا كان هناك عدد من الراصدين يتحركون بسرعة منتظمة كل منهم بالنسبة للآخر وأيضاً بالنسبة للمصدر الضوئي وإذا كل من الراصدين يقيس سرعة الضوء الخارج من المصدر فأنهم جميعاً سيحصلون على نفس القيمة لسرعة الضوء) .

هي نفس فكرة جاليلو عام 1600م وهذا الفرض هو أساس النظرية النسبية الخاصة والتي استغنت عن فكرة وجود الأثير. وأثبت أن سرعة الضوء ثابتة في جميع المراجع.

1- نظرية الدقائق لنيوتن :

تصور نيوتن أن الجسم المضيء تنبعث منة جسيمات دقيقة كروية تامة المرونة و تسير بسرعة منتظمة كبيرة جداً وتختلف من وسط إلى آخر حسب كثافته. وتكون حركة هذه الجسيمات الكروية في خطوط مستقيمة في الوسط المتجانس الواحد

وقد استدل نيوتن على أن الأشعة الضوئية عندما تصطدم بسطح عاكس فأن زاوية السقوط تساوي زاوية الانعكاس كاصطدام كرة تامة المرونة بسطح أملس مرتدة بحيث زاوية سقوطها تساوي زاوية انعكاسها.

أما في ظاهرة الانكسار فأنه قد فسره نيوتن عندما تخترق هذه الجسيمات الكروية الضوئية اوساطاً مختلفة الكثافة مثل الماء أو الزجاج فأنها تنكسر داخل كل وسط وتنحرف عن المسار المستقيم لها. فعند انتقال الضوء من وسط اقل كثافة مثل الهواء إلى وسط أكثر كثافة مثل الماء فأن الوسط المائي يحرف هذه الجسيمات الضوئية إلى أسفل ومعنى ذلك أن المركبة الرأسية لسرعة الضوء المنكسر سوف تقل بحيث تقترب الجسيمات الكروية الضوئية من العمود على السطح الفاصل بين الوسطين .

وبذلك سوف تزداد السرعة المحصلة أي أن سرعة الضوء في الوسط الكثيف سوف تزداد وتصبح أكبر من سرعة الضوء في الوسط الخفيف(أي أن سرعة الضوء تعتمد على الكثافة الضوئية للوسط).

وهذا غير صحيح ويخالف التجارب العلمية حيث أن سرعة الضوء تكون اكبر ما يمكن في الفراغ أي تزداد كلما قلت الكثافة للوسط فأن سرعة الضوء في ذروتها في الفراغ وبالتالي فشلت نظرية نيوتن في تفسير ظاهرة الحيود والتداخل والاستقطاب.

2- نظرية ماكسويل للموجات الكهرومغناطيسية :

وجد ماكسويل أن الضوء هو موجة كهرومغناطيسية سرعتها تساوي سرعة الضوء.

أي أن الضوء موجات كهرومغناطيسية لها طاقة إشعاعية وقد أتضح أنة ليست الشحنة الكهربائيه تولد مجالاً كهربائياً وهي ساكنة أو مجالاً مغناطيسياً وهي متحركة بل أيضا أن التغير في المجال الكهربائي يولد مجالاً مغناطيسياً وهذا نص قانون (أمبير) وأن التغير في المجال المغناطيسي يولد مجال كهربائي وهذا نص قانون (فاراداي).

هذه الحقيقة هي نص أو أصل تكوين الموجات الكهرومغناطيسية حيث أن شحنة كهربائية متذبذبة تولد في الفضاء مجالين كهربائي و مغناطيسي أي مجالاً (كهرومغناطيسي) متغير وهذا المجال يتحرك في الفراغ بسرعة الضوء نفسها(exp83).

C=1/ ((Ɛ.μ)^(1/2)) = 3 exp8

أما شدة الضوء (I) أو شدة الموجة الكهرومغناطيسية فهي

(الطاقة في وحدة الزمن لوحدة المساحة وعمودية على اتجاه انتشار الموجة)

I= Ɛ . (Eexp2) . c

حيث (E) شدة المجال الكهربائي أو المغناطيسي (B).

يحدد المدى التقريبي لطيف الكهرومغناطيسي من موجات الراديو ذات الطول الموجي الطويل إلى اشعة جاما ذات الطول الموجي القصير جداً والطاقة العالية. والضوء المرئي أي الذي يمكن للعين البشرية رصد موجاته يقع بين مدى من فوق البنفسجي إلى تحت الأحمر ومن الجدير بالذكر أنة لا توجد حدود تفصل مناطق الطيف من بعضها البعض.

عندما تسقط الموجات الكهرومغناطيسية على سطح ما وبصورة عمودية فأن الجسم يمتص تلك الأشعة وأن قوة تسمى قوة الأشعاع تظهر وتحسب من خلال العلاقة التالية :

© /F= P

حيث P هي الطاقة لكل وحدة زمن أي القدرة للموجةالكهرومغناطيسية الممتصة ويمكن الحصول على P من خلال العلاقة التالية:

u) / c) =P

حيث u هي الطاقة الكهرومغناطيسية.

3- نظرية اينشتين للفوتون :

من أهم العلماء الفيزيائيين الذين قاموا بتفسير سلوك الضوء حول العالم بلانك الذي درس الطاقة الإشعاعية المنبعثة من الأجسام الساخنة واستطاع حسابها بالقانون التالي:

E= h . f

حيث (E) هي الطاقة

و (h) هو ثابت يسمى ثابت بلانك ويساوي exp-34 J.s6.635)).

و (f) هو التردد الضوء المنبعث.

وأن الضوء ينبعث على شكل كمات صغيرة سماها الفوتون واقترح اينشتاين على اساس فرض بلانك أن الطاقة في الحزم الضوئية تسير في الفراغ بشكل حزم مركزة من الطاقة وهي الفوتونات ويكون انبعاثها على شكل كمات أي دفعات واقترح أن الضوء المار خلال الفراغ لا يسلك سلوك الموجة اطلاقاً بل سلوك جسيم الفوتون وبذلك تعارض اينشتاين في أول الأمر مع مبدأ النظرية الموجية للضوء التي حققت نتائج مخبريه عظيمة ولكن بعد مرور فترة زمنية أيد اينشتاين فكرة النظرية الموجية وعارض نفسه أي عارض مبدأ سلوك الجسيمات.

وفي عام 1924م وضع العالم (ديبرولي) مبدأ هام جداً وهو المبدأ السائد حتى الآن والذي نال على أثرة شهادة الدكتوراه في الفيزياء وينص على:(أن للضوء صفة مزدوجة فهو يسلك سلوك الموجة تحت ظروف معينة - (وهذا يفسر الانعكاس والانكسار والاستقطاب و الحيود و التداخل وهذا ما يتفق مع نظرية ماكسويل)- وأن الضوء يسلك سلوك الجسيم (الفوتون) تحت ظروف أخرى -(وهذا يفسر تفاعل الضوء مع المواد والظاهرة الكهروضوئية وظاهرة كومبتون وغيرها وهذا ما يتفق مع نظريات اينشتين- نيوتن) .

وهذا يعني أن للمادة صفة مزدوجة فإذا كان لدينا جسم كتلته (m) يتحرك بكمية حركة (p) فأن طول الموجة المصاحبة له تعطى من خلال القانون التالي :

$$\lambda = (h) / P :$$

ومن وجه نظري فأن هذا القانون مهم جداً وهو محور النظرية الكمية لاحظ في القانون أن

$$P. \lambda = h$$

حيث أن (p) تمثل الاعتبارات الجسيمية و (λ) الاعتبارات الموجة وحاصل ضربهم هو ثابت بلانك (h).

ويعني بشكل أدق أنه يمكن القول بأن حزمة أي حزمة ضوئية لها تردد وطول موجي ويمكن اعتبارها موجة ويمكن القول أن الحزمة الضوئية مشكلة من الفوتونات أي لها طاقة حركة وكمية حركة.

4- النظرية الموجية الكمية :

لدراسة انتقال الطاقة كحركة موجية يتطلب عادة وسط حيث تتذبذب جزيئات الوسط.

فالجسيم المتذبذب يؤثر بقوة على جارة فتجعله يتذبذب ايضاً وبهذه الطريقة فأن الحركة من جسيم إلى آخر وبالتالي يتم انتقال الطاقة الموجية وهي حالة مشابهة لما يحدث في الماء عندما تنقل الطاقة إلى الضفة دون أن تنتقل جسيمات الماء نفسه.

وفكرة الأثير ابتكرت كي يكون هذا الوسط هو الوسط الناقل لضوء بالطريقة السابقة. ولكن الضوء حسب النظرية الكهرومغناطيسية لا يحتاج إلى وسط فهو يأتي من الشمس أي في الفراغ الذي لا وسط فيه وبسرعة الضوء المطلقة وقد استبدل في النظرية الكهرومغناطيسية الجسيمات المتذبذبة في حركة منتظمة وتوافقية بتغير المجالين الكهربائي (E) والمغناطيسي (B).

وقد عرفت جبهة الموجة على أساس ذلك بأنها المحل الهندسي لجميع النقاط ذات الطور الواحد.

مبدأ هيجنز :

افترض هيجنز أن الضوء على هيئة موجات ولم يتعرض لطبيعة هذه الموجات ولا لخواصها الكهرومغناطيسية و أنما وضع مبدأ على أساس هندسي وينص المبدأ :

(أن جميع النقاط التي تقع على جبهة الموجة يمكن اعتبارها مصادر لأمواج نقطية ثانوية تصدر منها مويجات ثانوية كروية وأن السطح المماس لكل هذه المويجات الثانوية يشكل جبهة الموجة الجديدة).

معامل الانكسار:

يعرف معامل الانكسار أي وسط ضوئي بأنه :(النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ وسرعة الضوء في ذلك الوسط ويرمز له بالرمز(n).

v / © = n

وهو عديم الوحدة وهذه بعض قيمـــه :

للزجاج = 1.520

للماء =1.333

للهواء = 1.000001

الكثافة البصرية :

تعرف الكثافة البصرية لأي وسط شفاف مقياسا معامل انكساره. فيقال أن الكثافة البصرية عالية للوسط إذا كان معامل انكساره كبير. ويقال أن الكثافة البصرية للوسط صغيرة إذا كان معامل انكساره صغير.

المسار الضوئي:

لكي نعرف أساسيات البصريات الهندسية يجب التعرف على كمية جديدة تسمى المسار الضوئي.

ويمكن أعطاء تعريف للمسار الضوئي بأنــه :

(هو المسافة التي يقطعها الشعاع في الفراغ في نفس الزمن الذي يستغرقه اختراق الضوء أو الشعاع وسط مادي).

فإذا اخترق شعاع وسط معامل انكساره (n) لمسار هندسي (I) فيكون الزمن الذي استغرقة الشعاع في الوسط هو (t) ويساوي

v / (t = (I

(v) سرعة الضوء في ذلك الوسط.

ولكن v = (c) / n

إذاt = (L) / (v) = (nI) / (c) = (L) / c

حيث L=n.l هي المسافة التي يقطعها الشعاع بسرعة (c) أي في الفراغ وبشكل عام فأن :

المسار الضوئي = المسار الهندسي * معامل الانكسار

وعند وجود عدة اوساط معامل انكساراتها و (ni) (n1)(n2)

مبدأ فيرمات:

استناداً لتعريف المسار الضوئي اكتشف العالم فيرمات مبدأ مهم في البصريات الهندسية يمنح أي شعاع ضوئي مسارا من نقطة إلى أخرى ليكون الزمن للازم له اقصر ما يمكن أو اكبر ما يمكن أو يضل ثابت إذا قورن بالمسارات المتجاورة أي أنة مسار موقوف وباستخدام العلاقة التالية

$$t = L / c$$

يمكن القول بأن الشعاع الضوئي يسلك مسارا ضوئي اقصر ما يمكن أو اكبر ما يمكن أو مقدار ثابت. أي (L) تكون في نهاية عظمى أو صغرى أو مقدار ثابت بالنسبة لمتغير مستقل يعتمد على (L) وبفرض أن:

$$L= f x$$

ويكون

dx) = 0) / dL

وهذا هو التعبير الرياضي للمبدأ.

الفصل السادس
الضوء الهندسي

لفهم طبيعة أي علم من العلوم يتطلب تتبع تطور هذا العلم من مرحلة إلى أخرى، وأن نتعرف على أشهر علمائه الذين أسهموا في تقدمه عبر العصور. ومعرفة المراحل المختلفة التي مرت بها نظريات هذا العلم والوقوف على مواطن القوة و الضعف في كل نظرية من نظرياته يؤدى إلى فهم تام لهذا العلم.

و تاريخ تطور علم البصريات بفروعها المختلفة له صلة قوية بمراحل ازدهار و انحطاط الحضارات الإنسانية منذ عصورها القديمة و حتى عصرنا هذا.

طبيعة الضوء

اختلف العلماء في تفسير طبيعة الضوء و وضعت العديد من النظريات لتفسير هذه الطبيعة.

الضوء و الفلاسفة

كانت آراء فلاسفة الإغريق هي أول ما سجله العلم في محاولة تفسير حاسة الإبصار و فهم طبيعة الضوء و تعليل الظواهر الضوئية، و هو ما عرف في لغتهم باسم " أوبطيقا" Optics ، أي البصريات. لكن إنتاجهم العلمى في هذا المجال لم يكن وافيا و لم يتعمقوا كثيرا في الموضوعات التي درسوها.

أعتقد أفلاطون أن إبصار الأشياء يتم عن طريق خروج النور من العين على هذه المواد فيحدث الإبصار.

و لكن تلميذه أرسطو خالفه الرأي، و زعم أن الضوء ليس له وجود في ذاته، و أن الإبصار يتم بانطباع صور الأشياء في العين.

أما أبيقور فقد تخيل أن للأشياء التي نراها أشباحا أو صورا تنخلع عنها و تنبعث منها بصورة مستمرة و يتم الإبصار بورود هذه الصور إلى العين.

أما الرواقيون فقد كانت لهم فلسفة مختلفة عن سابقيهم، حيث افترضوا حدوث اتصال بين العين و الأجسام المرئية عن طريق شعاع يخرج من العين على شكل مخروط رأسه عند العين و قاعدته عند الجسم، فإذا لمس هذا الشعاع جسما ما حدث الإبصار. و قد شاع و اشتهر هذا الرأي في وقته حتى أن أصحاب هذا الرأي سموا "بأصحاب الشعاع".

و هكذا تعددت آراء فلاسفة الإغريق في طبيعة الضوء و تفسير الإبصار و ذلك لأن منهج التفكير في عصرهم كان فلسفيا يعتمد على التأمل العقلى الخالص بعيد عن التجربة والتحليل العلمى.

العرب مؤسسى علم البصريات:

يعتبر العالم العربي المسلم الحسن بن الهيثم واحدا من أعلام الحضارة الإسلامية الذين حققوا الريادة في وضع المنهج العلمي المبنى على التجربة و الاستقراء. و ينسب لحسن بن الهيثم تأسيس علم البصريات بأكمله، فقد ألف العديد من المراجع العلمية المهمة من بينها كتاب "المناظر" الذي نهل منه كل من أتى بعده وكان واحدا من المصادر الهامة التي اعتمدت عليها معظم جامعات أوروبا و الغرب الحديثة لعدة قرون. و استطاع بن الهيثم أن يضح حدا للخلافات القديمة حول تعريف الضوء و تفسير حاسة الإبصار، حيث أعزى إحساس الرؤية إلى عامل أو مؤثر خارجي له وجود و أسماه "الضوء".

و استطاع الحسن بن الهيثم من وضع تعريف للضوء بأنه عبارة عن " حرارة نارية تتألف من أشعة لها أطوال و عروض، تنبعث من الأجسام المضيئة كالشمس و الأجسام المتوهجة،

و إذا سقطت على جسم كثيف أسخنته، و إذا انعكست من مرآة مقعرة و تجمعت عند نقطة واحدة و كان عندها جسم يقبل الاحتراق أحرقته". و هذا التعريف يتفق مع ما نعرفه الآن عن طبيعة الطاقة الضوئية.

و ناقش ابن الهيثم عملية الإبصار، و بين في ذلك تركيب العين من الناحية التشريحية و وظيفة كل جزء من أجزائها، و أعزى حدوث الإبصار إلى تكون صور للمرئيات علم ما نسميه الآن شبكية العين و انتقال التأثير الحادث إلى المخ عن طريق العصب البصري. و علل ابن الهيثم رؤية الشئ واحدا على الرغم من النظر إليه بعينين اثنتين بوقوع الصورتين على جزئيين متماثلين من الشبكية. و تحدث كذلك عن تكبير المرئيات و ذلك وفقا لزاوية إبصارها و بعدها عن العين.

و بحث الحسن ابن الهيثم ظاهرة انعكاس الضوء و قد استطاع أن يضع أساسا نظريا لقانون الانعكاس و الذي توصل إليه فلاسفة اليونان و الذي ينص على أن " زاوية السقوط تساوى زاوية الانعكاس" و زاد عليه القانون الأخر الذي ينص على أن " زاويتى السقوط و الانعكاس تقعان في مستوى واحد عمودي على السطح العاكس".

كذلك بحث ابن الهيثم في ظاهرة انكسار الضوء عند نفاذه من وسط شفاف إلى وسط شفاف آخر مختلف عنه في الكثافة الضوئية، و أثبت قانوني هذه الظاهرة على أساس سرعة الضوء في الوسط الأقل كثافة ضوئية أكبر منها في حالة الوسط الأعلى كثافة ضوئية، و بين أن الشعاع المنكسر يقترب إلى العمود في الوسط الأعلى كثافة ضوئية، وقاس زاويتي السقوط والانكسار، و لم يزد العلم الحديث على ذلك إلا إثبات أن النسبة بين جيب زاوية السقوط إلى جيب زاوية الانكسار ثابتة لكل وسطين.

و تجدر الإشارة إلى أن هناك علماء آخرين كتبوا في البصريات مثل ابن سينا و ابن النفيس و الرازى و الكندى و غيرهم من العلماء العرب المسلمين الذين أسهموا في تطور هذا الفرع من العلوم. و لعل أول ما استحدثه الأوربيون في البصريات اختراعهم التلسكوب و الميكروسكوب في القرن السابع عشر الميلادي.
و بالرغم من كل هذه الإنجازات التي تمت في البصريات ألا إن طبيعة الضوء ظلت لفترات طويلة بعد ذلك موضع للاهتمام و الاختلاف بين العلماء و ذلك لتعارض هذه الطبيعة في تفسير ظاهرة ضوئية معينة. و من أهم النظريات التي وضعت لتفسير طبيعة الضوء و منها:

النظرية الجسيمية لنيوتن:- اعتقد نيوتن أن الضوء عبارة عن جسيمات دقيقة متناهية في الصغر تنتشر في الفراغ بسرعات عالية و قد نجحت هذه النظرية في تفسير ظاهرة الانتشار و الانعكاس و لكنها فشلت في تفسير ظاهرة الانكسار حيث افترضت أن سرعة الضوء في الوسط الأكبر كثافة ضوئية كالماء اكبر منها في حالة الوسط الأقل كثافة ضوئية كالهواء.

النظرية الموجية لهايجنز:- افترضت هذه النظرية أن الضوء عبارة عن موجات و أن كل نقطة على صدر الموجة تعتبر مصدر إطراب ثانوى. وأنه لابد من وجود وسط ماديلكي تنتشر من خلاله هذه الموجات و قد أعطى هيجنز مواصفات خاصة لهذا الوسط و سماه الأثير. هذا و قد استطاعت هذه النظرية في تفسير ظاهرة الانكسار حيث اعتبرت أن سرعة الضوء في الوسط الأكبر كثافة ضوئية كالماء اقل منها في حالة الوسط الأقل كثافة ضوئية كالهواء. و لكنها فشلت في إيجاد هذا الأثير كما أنها فشلت في تفسير ظاهرة الاستقطاب ....!

النظرية الكهرومغناطيسية لماكسويل:- حيث اعتبرت هذه النظرية ان الضوء عبارة عن موجات كهرومغناطيسية تنتشر في الفراغ. و من المعروف أن الموجة الكهرومغناطيسية تتكون من مجالين متعامدين أحدهما المجال الكهربي و الأخر هو المجال المغناطيسي و كلاهما متعامد على اتجاه انتشار الموجة، و من المعروف أيضا أن مثل هذه الموجات هي موجات مستعرضة. و من ثم استطاعت هذه النظرية من تفسير ظاهرة الاستقطاب و أهملت وجود الوسط (حيث أن هذه الموجات تنتشر في الفراغ). و لكن ظهرت حينئذ ظاهرة فيزيائية مهمة لم تستطع هذه النظرية من تفسيرها و هي الظاهرة الكهروضوئية.

النظرية الكمية لبلانك:- قد تنجح أي نظرية من النظريات السابقة في تفسير الظواهر الضوئية المعتمدة على تفاعل الضوء مع الضوء (الحيود و التداخل والاستقطاب و ....)، لكن عند دراسة تفاعل الضوء مع المادة (انبعاث و امتصاص و الظاهرة الكهروضوئية) فانه لا يمكن تفسير مثل هذه الظواهر إلا من خلال الطبيعة الكمية للضوء.

حيث افترضت هذه النظرية أن الضوء عبارة عن سيل من الفوتونات (الكمات) و أن طاقة كل فوتون تعطى من العلاقة

$$E = h\,\nu \quad (1)$$

حيث أن h ثابت بلانك و ν هو التردد لموجة الضوء (له علاقة بالطول الموجى و سرعة الضوء). و قد استطاعت هذه النظرية من تفسير ظاهرة انبعاث الإلكترونات من أسطح بعض الفلذات عند سقوط الضوء عليها و التي تسمى الطاهرة الكهروضوئية.

خواص الضوء

للضوء خواص متعددة حيث يمكن تجميعها سويا" في مجموعات و تصنيفها تحت واحد من ثلاث عناوين: البصريات الهندسية و البصريات الموجية و البصريات الكمية، وكل منها يمكن تقسيمه ثانية كما يلي:

البصريات الهندسية

الانتشار في خطوط مستقيمة

السرعة المحدودة

الانعكاس

الانكسار

التشتت

البصريات الموجية

التداخل

الحيود

الصفة الكهرومغناطيسية

الاستقطاب

الانكسار المزدوج

البصريات الكمية

المدارات الذرية

كثافة الاحتمالات

مستويات الطاقة

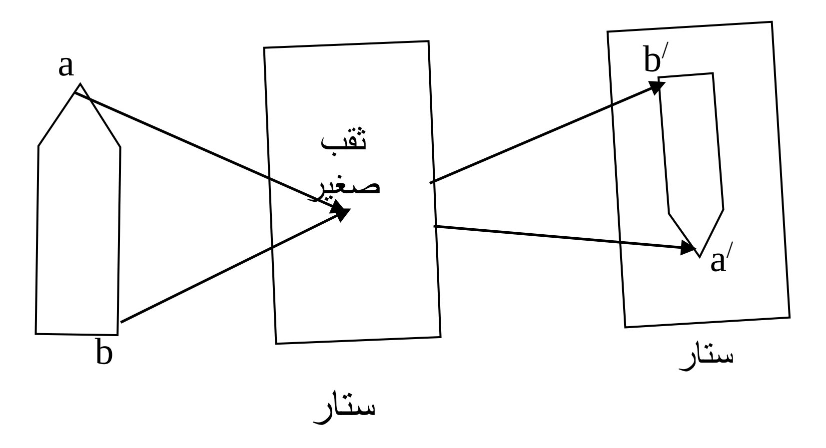
الكمات

الليزر

وسوف نهتم بدراستنا في هذا المقرر بالقسم الأول (البصريات الهندسية)، و هي توصف بواسطة الخطوط المستقيمة و الهندسة المستوية ومن هنا جاءت هذه التسمية.

انتشار الضوء في خطوط مستقيمة

انتشار الضوء في خطوط مستقيمة يعنى انتقال الأشعة الضوئية في خطوط مستقيمة. و يمكننا التأكد بسهولة من هذه الخاصية من خلال تكون الظلال الحادة للأجسام المختلفة. كذلك فإننا نجد في الكاميرات ذات الثقب إيضاحا آخر لذلك. ففي مثل هذه الكاميرات تتكون صورة الجسم على فيلم أو لوح فوتوغرافي من خلال مرور الضوء من ثقب صغير، انظر الشكل. حيث أن هناك شعاع واحد من الأشعة الضوئية الكثيرة المنبعثة من النقطة a قرب قمة المصباح يمر خلال الثقب الى النقطة /a قرب قاعدة ستار الصورة بالمثل فان الشعاع المنبعث من النقطة b قرب قاعدة المصباح يمر خلال الثقب ليصل الى النقطة /b قرب قمة ستار الصورة. و من ثم تتكون صورة مقلوبة للمصباح على الستار.



بهذه الطريقة يمكننا التقاط صورا فوتوغرافية للأجسام. ولكى تكون الصورة الملتقطة جيدة يجب ان يكون الثقب صغيرا جدا لأن حجم الثقب يحدد وضوح الصورة من عدمه.

ماذا يحدث لحجم الصورة عند تحريك الستار قريبا أو بعيدا من الثقب؟

سرعة الضوء

من المعروف أن الضوء ينتشر من مصدره بسرعة محددة تتوقف على كثافة الوسط الضوئية و لا تتوقف هذه السرعة على تردد الإشعاع نفسه، فهي واحدة لجميع الأمواج الكهرومغناطيسية من الأمواج اللاسلكية إلى أشعة جاما. و هناك العديد من الطرق لقياس سرعة الضوء.

هذا و قد استطاع العالم الفرنسى فوكو من قياس سرعة الضوء في الماء. الشكل الأتي يبين جهاز فوكو المستخدم. و هنا ينعكس الضوء المار خلال الشق S من مرآة مستوية دوارة R إلى مرآتين مقعرتين M1 , M2 تبعدان نفس المسافة عن المرآة المستوية. وعندما تكون R في الوضع 1 ينتقل الضوء إلى M1 ثم يعود على نفس مساره إلى R ثم يمر خلال العدسة L ثم يصل إلى العين E .

و عندما تكون R في الوضع 2 فان الضوء يقطع المسار السفلى بنفس الكيفية السابقة(E1). و عند ملئ الأنبوبة T بالماء و تكرار نفس التجربة سوف تحدث إزاحة للصورة من الوضع E1 الى الوضع E2 . و قد لاحظ فوكو أن الشعاع المار خلال الأنبوبة يعانى إزاحة اكبر من الآخر. هذا يعنى أنه يستغرق في قطع المسار السفلى خلال الماء وقتا" أطول مما يستغرقه في قطع المسار العلوى خلال الهواء.

هل هذه التجربة تحقق النظرية الجسيمية لنيوتن أم النظرية الموجية لهايجنز؟

و بعد اكثر من أربعين عاما قاس الفيزيائى الامريكى مايكلسون سرعة الضوء في الهواء و الماء.

V (water) = 225.000 Km/sec.

C (air) = 3.0x1010 m/sec.

معامل الانكسار

يعرف معامل انكسار أى وسط ضوئى بأنه النسبة بين سرعة الضوء في الفراغ الى سرعته في الوسط:

معامل الانكسار(n) = سرعة الضوء في الفراغ / سرعة الضوء في الوسط.(2)

علل معامل انكسار أى وسط > الواحد.؟

تعتبر الكثافة البصرية (الضوئية) لأى وسط شفاف مقياسا لمعامل انكساره، و يقال أن الكثافة البصرية للوسط عالية إذا كان معامل انكساره كبيرا، كما يقال أن الكثافة البصرية للوسط صغيرة إذا كان معامل انكساره صغيرا.

المسير البصرى

يعتبر المسير البصرى أحد أهم المبادئ في البصريات الهندسية. ويعطى مسير شعاع ضوئى في أى وسط بحاصل ضرب السرعة (في الوسط) في الزمن:

$$d = v\,t$$

و حيث أن $n = c / v$ ، فان $v = c / n$ ، وبذلك فان

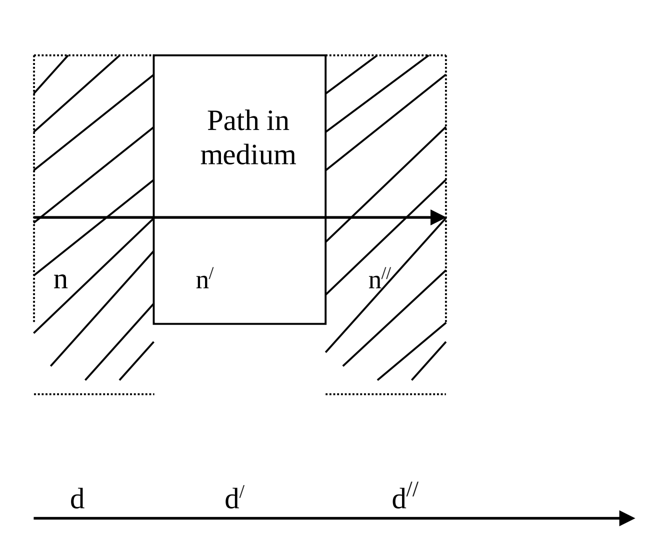
$$d = (c / n) \times t \quad or \quad n\,d = c\,t$$

و يسمى المقدار $n\,d$ بالمسير البصرى و يرمز له بالرمز Δ .

$$\Delta = nd \quad (3)$$

و بذلك فان المسير البصرى يمثل المسافة التي يقطعها الضوء في الفراغ في نفس الزمن الذي يقطع فيه الضوء المسافة d في الوسط. فإذا كان الشعاع الضوئى يمر خلال سلسلة من الأوساط أسماكها هي......... ,//d,d/, d و معاملات انكسارها هي ...... ,//n, n/, n فان المسير البصرى الكلى يساوى مجموع المسيرات البصرية المنفردة شكل (3).

$$\Delta = n\, d + n/\, d/ + n//\, d// + \ldots\ldots\ldots \qquad (4)$$



المســـير البصـــرى خـــلال سلســـلة مـــن الأوســـاط

بعض المفاهيم الأساسية في قياس الضوء

الفيض الضوئى:

يعرف الفيض الضوئى بكمية الضوء المنبعثة من المصدر الضوئى في الثانية الواحدة. و يقاس الفيض الضوئى بوحدة تسمى اللومن و هو الفيض المنبعث في الثانية خلال زاوية مجسمة مقدارها الوحدة من مصدر قوة إضاءته شمعة عيارية.

من هذا نرى أن الشمعة العيارية تبعث في جميع الاتجاهات فيضا مقداره 4π لومن في الثانية الواحدة. فإذا فرضنا مصدرا قوة إضاءته F شمعة عيارية فان كمية الضوء المنبعثة منه في الثانية الواحدة هي $4\pi F$.

شدة الاستضاءة:

تعرف شدة استضاءة سطح بكمية الضوء (الفيض) الذي يسقط عموديا على وحدة المساحات في الثانية الواحدة.

فاذا تصورنا كرة جوفاء مركزها المصدر و نصف قطرها r فان شدة الاستضاءة عند أى نقطة على سطح الكرة تعطى من

$$I=\frac{4\pi F}{4\pi r^2}=\frac{F}{r^2} \quad \text{lux} \quad (5)$$

و الوحدة العملية لقياس شدة الاستضاءة هي اللاكس وهي الفيض الضوئى لكل متر مربع.

قانون التربيع العكسى:

اذا فرضنا وجود مصدر ضوئى عند مركز كرتين، نصفي قطرهما r1, r2 فان شدة الاستضاءة على سطح الكرة الأول

$$I_1 = \frac{4\pi F}{4\pi r_1^2} = \frac{F}{r_1^2} \quad (6)$$

و شدة الاستضاءة على سطح الكرة الثانى

$$I_2 = \frac{4\pi F}{4\pi r_2^2} = \frac{F}{r_2^2} \quad (7)$$

من هنا نرى أن شدة الاستضاءة على سطح مضاء تتناسب عكسيا مع بعد السطح عن المصدر و طرديا مع قوة المصدر، و هذا هو قانون التربيع العكسى.

و عليه تكون النسبة بين شدة استضاءة السطحين هي

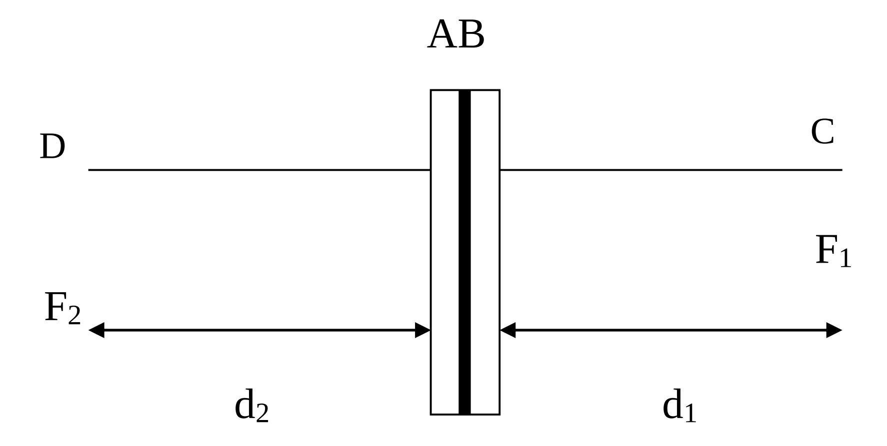
$$\frac{I_1}{I_2}=\frac{r_2^2}{r_1^2} \quad (8)$$

الفوتومترات:

الفوتومترات هي أجهزة يمكن استخدام سطحها للمقارنة بين قوتي إضاءة مصدرين، و ذلك بتغير بعدهما حتى تصبح شدة الاستضاءة الناتجة عنهما متساوية.

فوتومتر جولي:

يتركب فوتومتر جولي من لوحين متماثلين A, B من شمع البرافين يفصلهما صفيحة من القصدير.



فإذا وضع المصدران المراد مقارنة قوة إضاءتهما على جانبى الفوتومتر عند النقطتين C, D فان اللوح A يصبح مضاء بالمصدر ذى القوةF1 و اللوح B يصبح مضاء بالمصدر ذى القوة F2 كما بالشكل. وبتغير موضع المصدرين حتى تصبح شدة استضاءة اللوحين واحدة فان:

$$I_1=\frac{F_1}{d_1^2} \quad , \quad I_2=\frac{F_2}{d_2^2}$$

و عند تحقق الشرط I1 = I2 نحصل على:

$$\frac{F_1}{F_2}=\frac{d_1^2}{d_2^2} \quad (9)$$

حيث d2, d1 بعدا المصدرين على الترتيب.

مسائل

مصدران قوة إضاءتهما 32 شمعة ، 100 شمعة و المسافة بينهما 63 سم. وضع بينهما فوتومتر جولى بحيث كانت شدة الاستضاءة على أحد وجهيه ضعف شدة الاستضاءة على الوجه الأخر. أوجد المسافة بين كل مصدر و الفوتومتر.

علق مصباح على ارتفاع 90 سم من مركز منضدة مستديرة قطرها 240 سم قارن بين شدة الاستضاءة عند مركزها و عند أى نقطة على حافتها.

إذا كان بعد القمر عن الأرض 3.84x105 km فما هو الزمن الذي يستغرقه الضوء للانتقال من الأرض إلى القمر و العودة مرة أخرى.

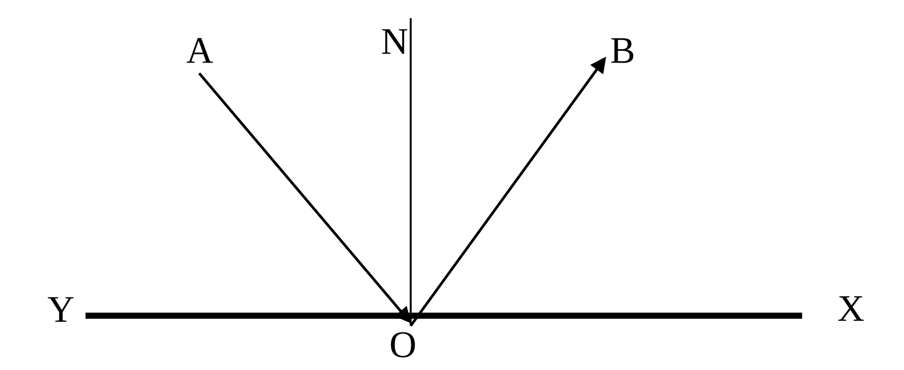
شعاع ضوئى يمر مسافة قدرها 285,6 سم خلال الماء ثم مسافة قدرها 15,4 سم خلال الزجاج و أخيرا مسافة قدرها 174,2 سم خلال الزيت. إذا علمت أن معاملات انكسار الماء و الزجاج و الزيت هي 1,33 و1,636 و 1,387 على الترتيب، أوجد المسيرات البصرية في الأوساط الثلاثة

المسير البصرى الكلى.

انعكاس الضوء

عندما يسقط الضوء على الحد الفاصل XY بين وسطين مختلفين في كثافتهما الضوئية، فان جزء من الشعاع الساقط ينعكس عائدا إلى الوسط، أما الجزء الآخر فانه يخترق الوسط الثانى حيث يمتص إذا كان الوسط معتما أو ينفذ من خلاله إذا كان الوسط شفافا. أما إذا كان ما ينفذ من الضوء قليلا بحيث تصعب معه الرؤية فان الوسط يسمى نصف شفاف.

الانعكاس عند الأسطح المستوية



ينعكس الضوء من السطح العاكس وفقا للقوانين الآتية:

القانون الأول:

الزاوية التي يصنعها الشعاع الساقط مع العمود المقام من نقطة السقوط تساوى الزاوية التي يصنعها الشعاع المنعكس مع ذلك العمود.

زاوية السقوط = زاوية الانعكاس

القانون الثاني:-

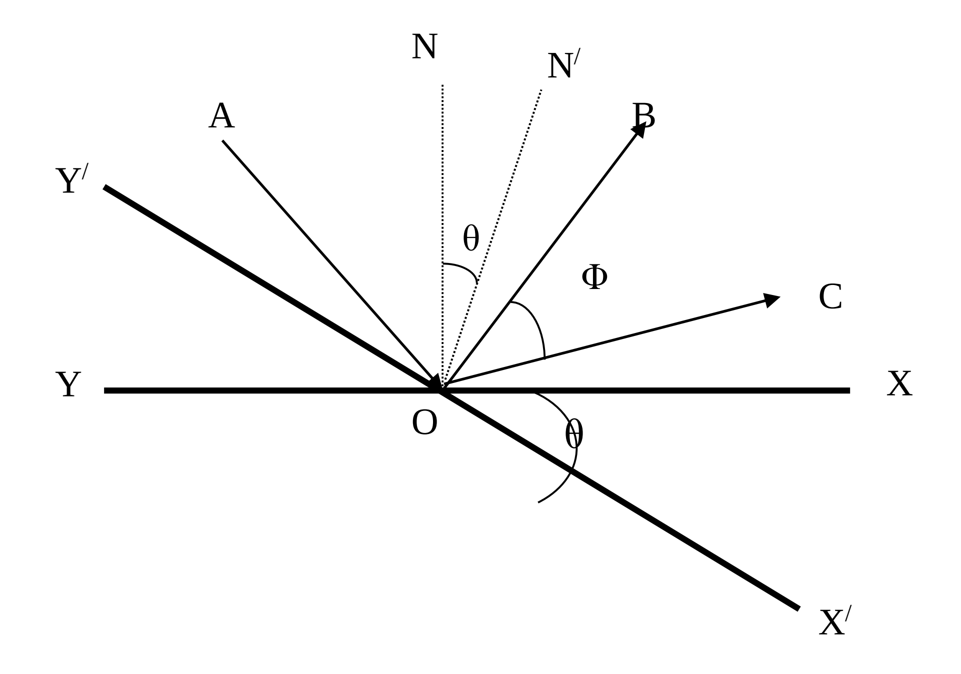
الشعاع الساقط و العمود و الشعاع المنعكس يقعوا جميعا في مستوى واحد عمودى على السطح الفاصل بين الوسطين.

فإذا كان XY يمثل سطح مرآة مستوية كما بالشكل، و أن AO يمثل الشعاع الساقط على هذا السطح، و أن OB يمثل الشعاع المنعكس، فان

$$\hat{AON} = \hat{BON} \quad (1)$$

تأثير دوران السطح العاكس

إذا افترضنا الشكل السابق مع افتراض دوران السطح العاكس XY بزاوية θ لكى يأخذ الوضع /X/ Y كما موضح بالشكل التالي، و أن اتجاه الشعاع المنعكس عند هذا الوضع هو OC، و ليكن /ON هو العمود على /X/ Y و Φ هي زاوية الانحراف بين الشعاع المنعكس على السطح الأول و الشعاع المنعكس على السطح الثاني.



يتضح من الشكل أن:

$$A\hat{O}N = B\hat{O}N$$

$$\therefore \quad A\hat{O}N = B\hat{O}N' + \theta \quad (2)$$

كذلك

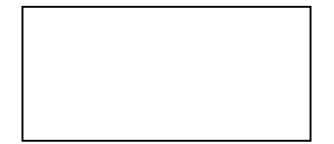
$$A\hat{O}N' = C\hat{O}N'$$

$$\therefore \quad A\hat{O}N + \theta = \Phi + B\hat{O}N' \quad \textbf{(3)}$$

من المعادلتين 2,3 يمكننا الحصول على:

$$B\hat{O}N' + \theta + \theta = \Phi + B\hat{O}N'$$

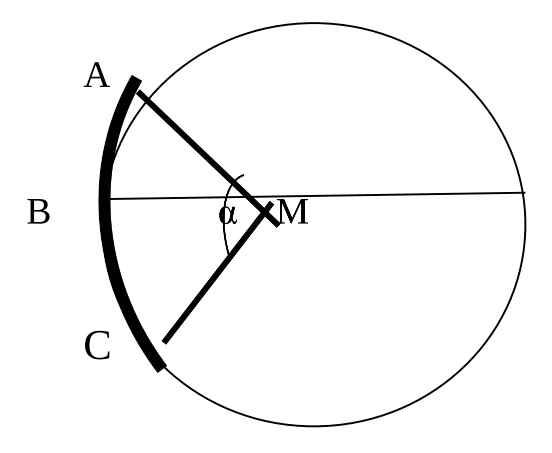
$$\therefore \quad 2\theta = \Phi \quad \textbf{(4)}$$



أى أن دوران السطح العاكس بزاوية θ ينتج عنه انحراف الشعاع المنعكس بضعف زاوية الدوران.

المرايا الكرية:-

يمكن تعريف المرآة الكرية بأنها السطح الناتج من تقاطع كرة بمستوى. و تكون المرآة مقعرة إذا كان سطحها الداخلي عاكسا وتكون محدبة إذا كان سطحها الخارجي عاكسا.



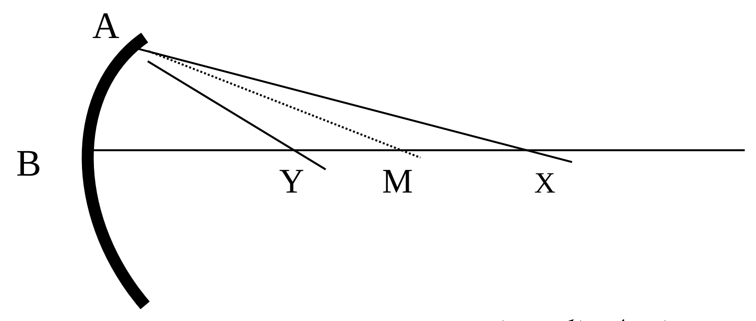
ويسمى قطر دائرة تقاطع الكرة بالمستوى بالاتساع الخطى للمرآة، أما الاتساع الزاوي فتقدر قيمته بمقدارالزاوية α كما بالشكل. ويسمى المستقيم الواصل بين قطب المرآة B ومركز تكورها M بالمحور الرئيسي للمرآة.

مصطلح الإشارات:-

جميع المسافات – مقاسة من قطب المرآة - تكون سالبة في اتجاه انتشار الضوء و موجبة في الاتجاه المضاد لانتشار الضوء.

يكون البعد البؤرى موجبا للمرآة المقعرة و سالبا للمرآة المحدبة.

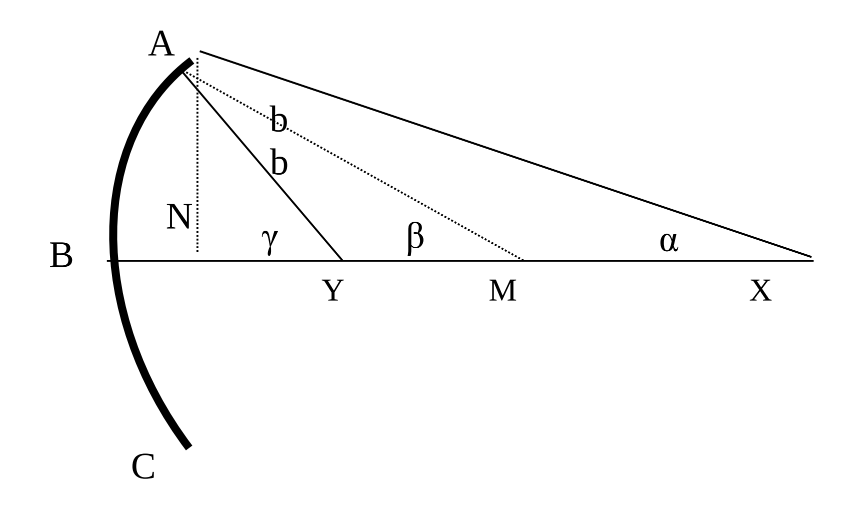
فإذا فرضنا أن X نقطة مضيئة على المحور الرئيسى لمرآة مقعرة، فان بعد الجسم BXيكون موجبا و بعد الصورة BY يكون موجبا كذلك (انظر الشكل).



الانعكاس عند السطح الكرى المقعر

يمكن الاستفادة من قوانين الانعكاس للأسطح المستوية باعتبار أن السطح الكرى العاكس يتكون من عدد كبير من المرايا المستوية.

فإذا فرضنا أن ABC يمثل مرآة مقعرة مركزهاM . لنفرض كذلك أن X نقطة مضيئة واقعة على محور المرآة و تبعد عتها مسافةX . فإذا كان AX يمثل شعاع ضوئى ساقط، فانه ينعكس في الاتجاه AY بحيث أن:



يتضح من الشكل الآتي أن:

$$\beta = b + \alpha \,, \quad \gamma = b + \beta$$

$$\therefore \quad 2\beta = \alpha + \gamma \quad (5)$$

فإذا فرضنا أن الاتساع الزاوى للمرآة صغير بحيث يكونBY و AY متساويين تقريبا وكذلك BX و AX فان الزوايا α ، β ، γ تكون صغيرة و بذلك يمكن اعتبار الآتي:

$$\alpha = \frac{N}{X} \; \beta = \frac{N}{r} \; \gamma = \frac{N}{Y}$$

بالتعويض في المعادلة (5) ينتج أن:

$$\frac{2}{r} = \frac{1}{X} + \frac{1}{Y} \quad (6)$$

حيث أن r هو نصف قطر تكور المرآة.

و هذه هي المعادلة العامة التي تدل على العلاقة بين بعد الجسم عن قطب المرآة المقعرة و بعد الصورة التي تتكون له على محور المرآة.

فإذا كان الجسم في ما لانهاية، فان X تكون كبيرة جدا و بذلك يأل المقدار 1/X إلى الصفر و يكون:

$$\frac{2}{r} = \frac{1}{Y}$$

يتضح من هذه النتيجة أنه إذا سقطت حزمة من الأشعة المتوازية على مرآة مقعرة في اتجاه محورها الرئيسى فإنها تنعكس إلى نقطة على المحور عند منتصف المسافة بين القطب و مركز تكور السطح العاكس و تسمى هذه النقطة البؤرة و يسمى بعدها عن القطي البعد البؤري Z .

أى أن

$$\frac{1}{Z} = \frac{1}{X} + \frac{1}{Y} \quad (7)$$

مثال

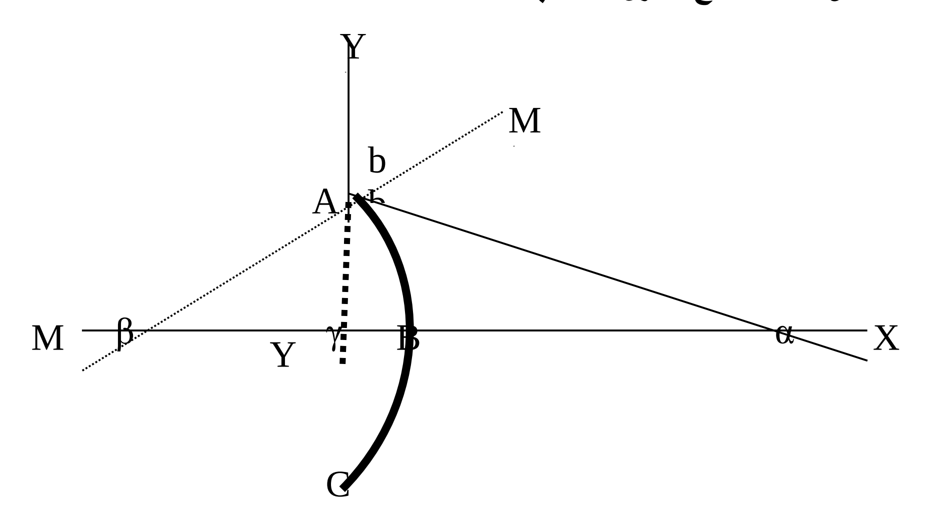
إذا وضع جسم على بعد 20 cm من قطب مرآة مقعرة قطرها 10 cm ، أوجد بعد الصورة المتكونة عن قطب المرآة و كذلك البعد البؤرى لهذه المرآة.

الحل

$$\frac{2}{5} = \frac{1}{20} + \frac{1}{y}$$

(بعد الصورة) , y = 2.86 cm (البعد البؤرى) z = 2.5 cm

الانعكاس عند السطح الكرى المحدب



إذا فرضنا XA شعاع ضوئيا يسقط على سطح مرآة محدبة عند النقطةA فانه ينعكس في الاتجاه /AY بحيث

$$X\hat{A}M'=Y'\hat{A}M'$$

و من الملاحظ أن الشعاع المنعكس لا يقطع محور المرآة و لكن امتداده هو الذي يقطع محور المرآة عند النقطة Y خلف المرآة ليكون صورة تقديرية للجسم.

و يتضح من الشكل أن:

$$\hat{b}=\alpha+\beta \text{ ,} 2\hat{b}=\alpha+\gamma$$

$$\therefore \quad 2\alpha+2\beta=\alpha+\gamma$$

أى أن

$$2\beta=-\alpha+\gamma \quad \textbf{(8)}$$

و إذا تتبعنا قاعدة الإشارات و كان الاتساع الزاوى صغير فان

$$\beta=\frac{N}{-r} \quad \gamma=\frac{N}{-Y} \qquad \alpha=\frac{N}{X}$$

بالتعويض في المعادلة (8) ينتج أن:

$$-\frac{2}{r}=-\frac{1}{X}-\frac{1}{Y}$$

$$\frac{2}{r}=\frac{1}{X}+\frac{1}{Y} \quad \textbf{(9)}$$

وهي المعادلة العامة التي تربط العلاقة بين بعد الجسم عن قطب المرآة المحدبة و بعد الصورة التقديرية التي تتكون له على محور المرآة.

وإذا فرضنا أن النقطة X في ما لانهاية فان 1/X يأل إلى الصفر وبذلك يكون.

$$\frac{2}{r}=\frac{1}{Y} \quad \textbf{or} \quad Y=\frac{r}{2} \quad \textbf{(10)}$$

وحيث أن مركز تكور المرآة المحدبة يقع خلفها فانه تبعا لقاعدة الإشارات تكون r سالبة.

ويتضح من هذه النتيجة أنه إذا سقطت حزمة من الأشعة المتوازية على مرآة محدبة في اتجاه محورها فإنها تنعكس عند نقطة تقديرية خلف المرآة عند منتصف المسافة بين القطب ومركز تكور المرآة، و تسمى هذه النقطة البؤرة، و يسمى بعدها عن القطب البعد البؤرى.

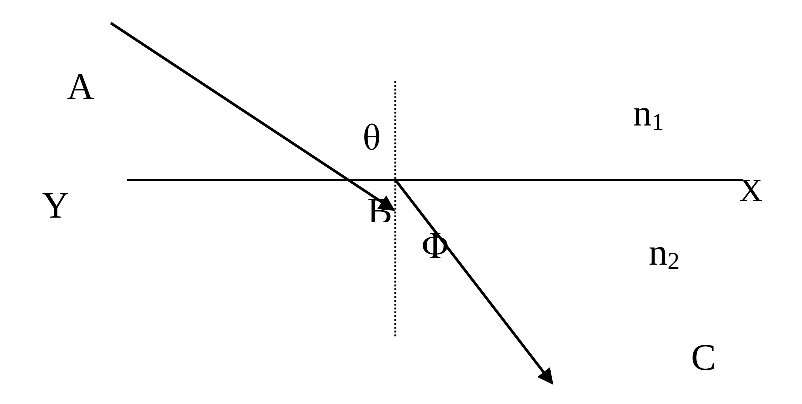
انكسار الضوء

الانكسار عند الأسطح المستوية

إذا مر شعاع ضوئي من وسط شفاف متجانس إلى آخر فانه ينكسر عند السطح المستوى الفاصل وفقا للقوانين الآتية:

القانون الأول:

النسبة بين جيب زاوية السقوط و جيب زاوية الانكسار تساوى مقدار ثابت و ذلك لجميع زوايا السقوط.



فإذا كان XY يمثل سطحا مستويا يفصل بين وسطين معامل انكسارهما n2, n1 و أن AB يمثل الشعاع الضوئي الساقط و أن BC يمثل الشعاع المنكسر، فان

$$\frac{\sin(\theta)}{\sin(\Phi)} = const. \quad (1)$$

هذا القانون يعرف بقانون سنل. وقد بين سنل أن قيمة المقدار الثابت هي النسبة بين معاملى انكسار الوسطين. و من ذلك هذه العلاقة تأخذ الصورة:

$$\frac{\sin(\theta)}{\sin(\Phi)} = \frac{n_2}{n_1} \quad (2)$$

التي يمكن كتابتها على الصورة:

$$n_1 \sin(\theta) = n_2 \sin(\Phi) \quad (3)$$

و إذا كان أحد معاملى الانكسار أو كلاهما مختلف عن الوحدة، فان النسبة بين معاملى الانكسار تسمى معامل الانكسار النسبى و العلاقة (2) تأخذ الشكل:

$$\frac{\sin(\theta)}{\sin(\Phi)} = n' \quad (4)$$

و إذا كان الوسط الأول هو الفراغ أى n1= 1 ، فان قيمة المعامل النسبى ستكون هي نفس قيمة معامل انكسار الوسط الثانى. و يمكن الحصول على نفس النتيجة تقريبا عندما يكون الوسط الأول هو الهواء وليس الفراغ.

و عندما تكون زوايا السقوط و الانكسار صغيرة جدا، فانه يمكننا وضع جيوب الزوايا مساوية للزوايا ذاتها

أى أن: $\sin(\theta) = \theta$ and $\sin(\Phi) = \Phi$

و بذلك نحصل على:

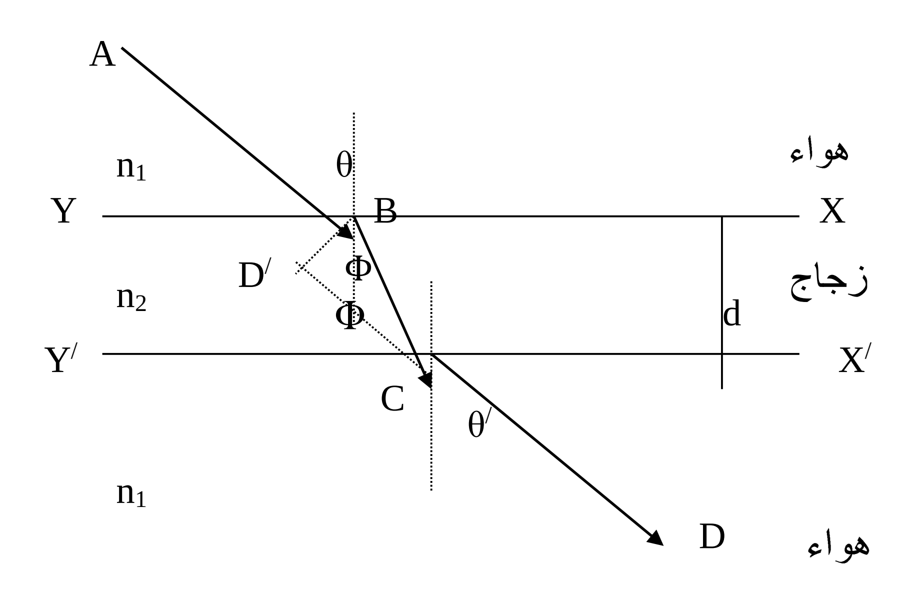
$$\frac{\theta}{\Phi} = \frac{n_2}{n_1} \quad (5)$$

القانون الثاني:

الشعاع الساقط و العمود و الشعاع المنكسر يقعوا جميعا في مستوى واحد عمودى على السطح الفاصل بين الوسطين.

الانكسار خلال وسط محدود بسطحين متوازيين

نفرض أن AB شعاع يسقط من الهواء على أحد السطحين المتوازيين لكتلة من الزجاج كما بالشكل.



الشعاع BC ينكسر بزاوية انكسار Φ و من قانون سنل نجد أن:

$$\frac{\sin(\theta)}{\sin(\phi)} = \frac{n_2}{n_1} \qquad (6)$$

و هذا الشعاع يسقط على السطح المستوى الثانى بالزاويةΦ و ينكسر ليخرج إلى

الهواء مرة أخرى في الاتجاه CD بزاوية/θ و بالتالي فان:

$$\frac{\sin(\phi)}{\sin(\theta')} = \frac{n_1}{n_2} \qquad (7)$$

من المعادلتين (6) و (7) نجد أن

$$\frac{\sin(\theta)}{\sin(\phi)} \cdot \frac{\sin(\phi)}{\sin(\theta')} = 1 \qquad (8)$$

$$\therefore \quad \theta = \theta'$$

من ذلك نستنتج أن الشعاع CD يخرج موازيا لاتجاهه الأصلي AB و يفصله عن

اتجاهه الأصلي المسافة /BD التي تعطى من العلاقة الآتية

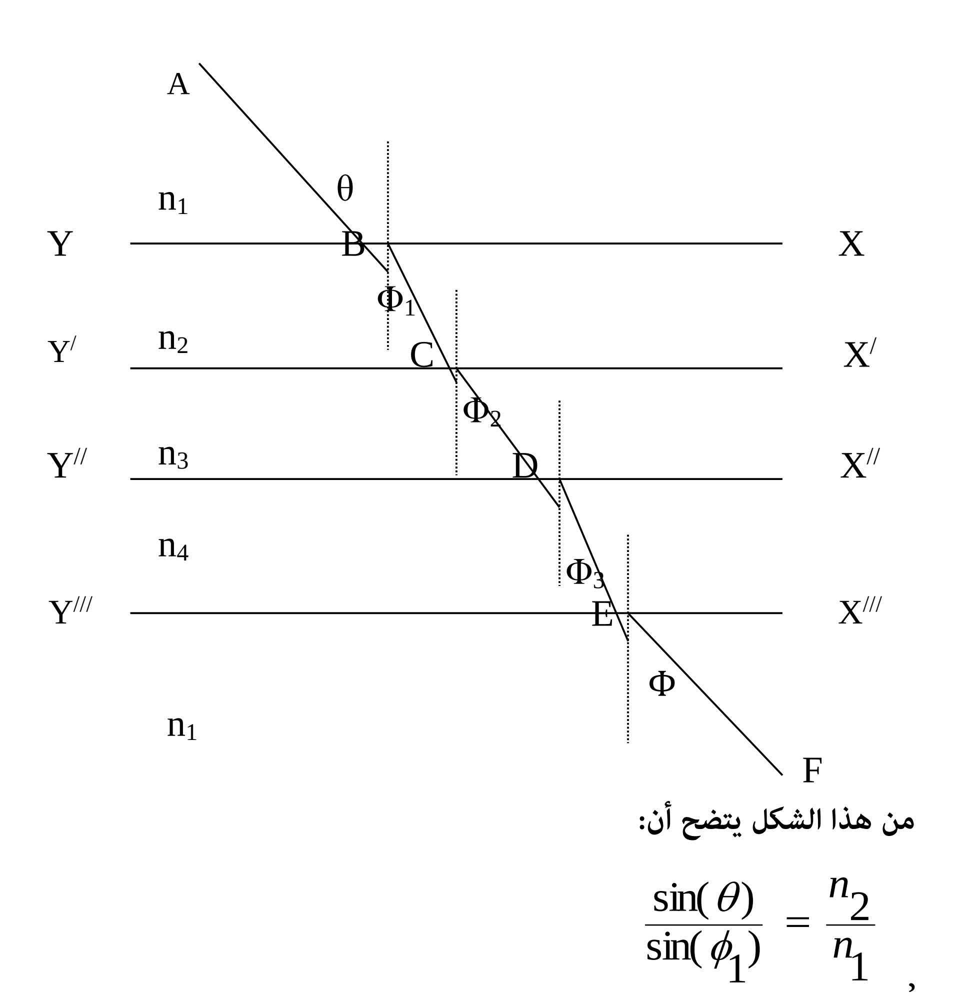
$$BD' = \frac{d}{\cos(\phi)} \sin(\theta - \phi) \quad \textbf{(9)}$$

حيث أن d المسافة بين السطحين المتوازيين (السمك).

المطلوب إثبات هذه العلاقة.

الانكسار خلال أوساط متعاقبة محدودة بأسطح متوازية

نفرض أن AB يمثل اتجاه شعاع ساقط من الوسط الأول ذو معامل الانكسارn1 على السطح الفاصل XY بينه و بين الوسط الثانى ذو معامل الانكسار n2 و أن اتجاه الشعاع المنكسر في الوسط الثانى هو BC . وبتكرار عملية السقوط من الوسط الثانى إلى الوسط الثالث ذو معامل الانكسار n3 ، فانه يمكننا الحصول على الشكل الآتي الذي يوضح عملية الانكسار التي تحدث داخل الأوساط المحددة بالأسطح المستوية. و نفرض أن آخر شعاع ضوئى سوف ينكسر في وسط له نفس معامل انكسار الوسط الأول.



من هذا الشكل يتضح أن:

$$\frac{\sin(\theta)}{\sin(\phi_1)} = \frac{n_2}{n_1} \quad ,$$

$$\frac{\sin(\phi_1)}{\sin(\phi_2)} = \frac{n_3}{n_2} \quad ,$$

$$\frac{\sin(\phi_2)}{\sin(\phi_3)} = \frac{n_4}{n_3} \quad ,$$

$$\frac{\sin(\phi_3)}{\sin(\phi)} = \frac{n_1}{n_4}$$

و من هذه المعادلات نجد أن

$$\frac{\sin(\theta)}{\sin(\phi_1)} \cdot \frac{\sin(\phi_1)}{\sin(\phi_2)} \cdot \frac{\sin(\phi_2)}{\sin(\phi_3)} \cdot \frac{\sin(\phi_3)}{\sin(\phi)} =$$

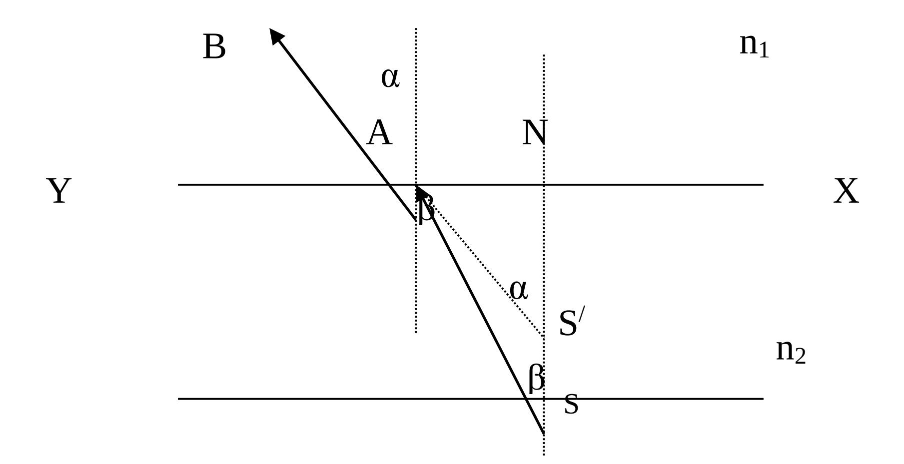
$$\frac{n_2}{n_1} \cdot \frac{n_3}{n_2} \cdot \frac{n_4}{n_3} \cdot \frac{n_1}{n_4} = 1 \quad \textbf{(10)}$$

$$\therefore \quad \sin(\theta) = \sin(\phi) \therefore \quad \theta = \phi$$

أي أن الشعاع EF يخرج موازيا اتجاهه الأصلي AB .

السمك الظاهري :

نفرض أن S نقطة مضيئة موجودة في وسط شفاف معامل انكساره n2 ،فان SA يمثل شعاع ساقط من هذه النقطة على السطح المستوى XY الذي يفصل بين هذا الوسط و وسط آخر شفاف معامل انكساره n1 و أقل كثافة ضوئية من الوسط السابق، و أن AB يمثل اتجاه الشعاع المنكسر في هذا الوسط كما بالشكل.



نفرض كذلك أن SN هو اتجاه شعاع خارج من النقطةS في الاتجاه العمودى على السطح XY ، هذا الشعاع ينفذ إلى الوسط الثانى دون أن يعانى أي انكسار. فإذا مد الشعاع BA ليقابل SN في /S فان:

$$\frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)} = \frac{n_1}{n_2}$$

أيضا من هذا الشكل نجد أن

$$\frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)} = \frac{\frac{AN}{AS}}{\frac{AN}{AS'}} = \frac{AS'}{AS} \qquad \textbf{(11)}$$

$$\therefore \quad AS' = AS\,\frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)} \tag{12}$$

و تدل هذه النتيجة على أن وضع النقطة /S ليس ثابتا بل يتوقف على زاوية رأس مخروط الأشعة التي ترى بها العين النقطة المضيئةS .

فإذا كانت العين قريبة من الخط العمودى، فان كل منα و β تكون صغيرة و بذلك يمكن اعتبار أن:

$$\frac{AS}{AS'} = \frac{NS}{NS'} \tag{13}$$

$$\therefore \quad \frac{NS'}{NS} = \frac{\sin(\beta)}{\sin(\alpha)} = \frac{n_1}{n_2} \tag{14}$$

و بذلك يكون البعد الظاهرى /NS أقل من البعد الحقيقى NS . لماذا؟؟

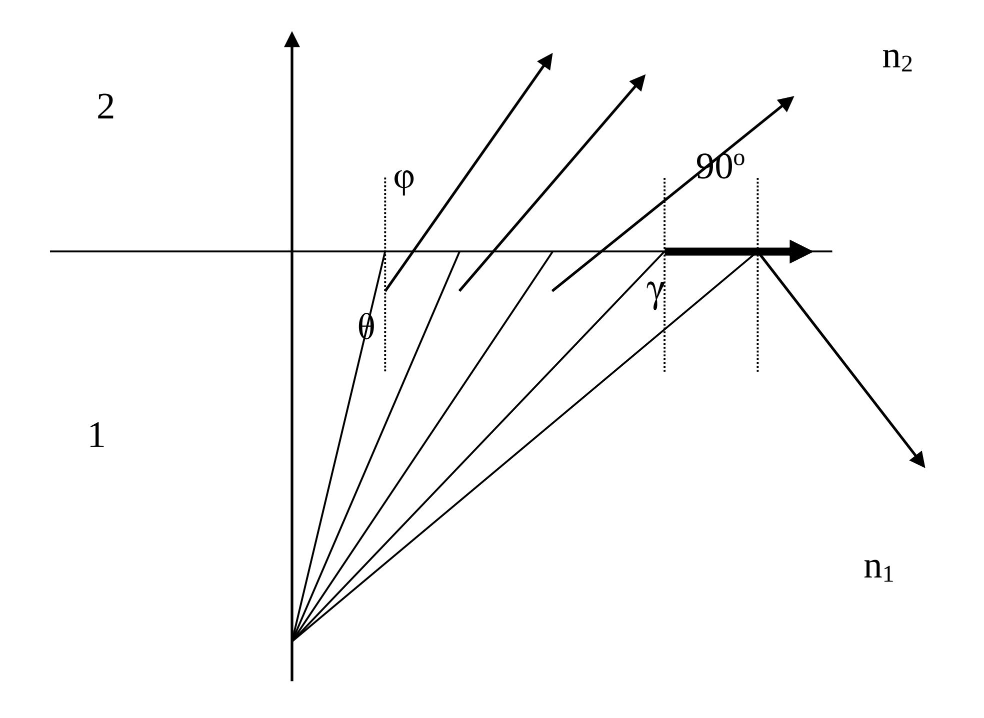
و تقدر إزاحة الصورة في الاتجاه العمودى بالمقدار /SS الذي يعطى من:

$$SS' = NS - NS' = NS\left[1 - \frac{NS'}{NS}\right] \tag{15}$$

$$\therefore \qquad SS' = NS\left[1 - \frac{n_1}{n_2}\right] \quad \textbf{(16)}$$

الزاوية الحرجة و الانعكاس الكلى

عندما يمر شعاع من وسط كثيف إلى وسط أقل كثافة ضوئية فانه ينكسر مبتعدا عن العمود على سطح الانفصال، أى أن زاوية الانكسار تكون أكبر من زاوية السقوط كما بالشكل الآتي.



من الشكل نجد أن:

$$\frac{\sin(\theta)}{\sin(\phi)} = \frac{n_2}{n_1}$$

و من الملاحظ أنه كلما ذادت زاوية السقوط ذادت زاوية الانكسار حتى إذا بلغت زاوية السقوط قيمة معينة γ فان الشعاع المنكسر يخرج في الوسط الثانى موازيا للسطح الفاصل و زاوية انكساره قائمة.

$$Sin(\gamma) = {}^{n_2}\!/_{n_1} \quad \textbf{(17)}$$

و تسمى زاوية السقوط γ في الوسط الكثيف التي تقابلها زاوية انكسار 90o بالزاوية الحرجة للوسطين 1 و 2 .

و إذا ذادت زاوية السقوط في الوسط الكثيف عن الزاوية الحرجة فان الشعاع لا ينفذ إلى الوسط الأقل كثافة و إنما ينعكس عند سطح الانفصال انعكاسا كليا في الوسط الكثيف وفقا لقانوني الانعكاس. و يسمى انعكاس الضوء عندئذ بالانعكاس الكلى الداخلي حيث انه لا ينفذ تماما إلى الوسط الخفيف.

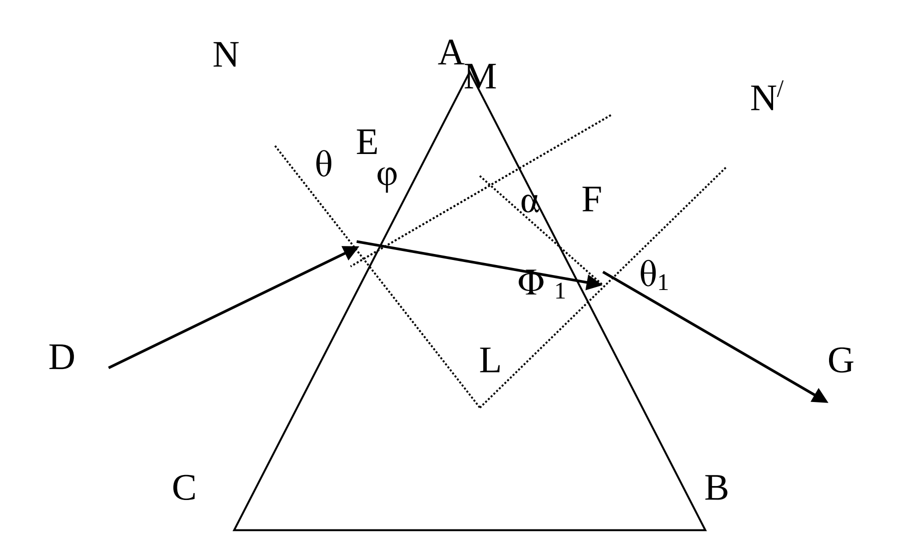
انكسار الضوء خلال المنشور الثلاثي:

المنشور الثلاثي هو جزء من وسط شفاف متجانس محدود بسطحين غير متوازيين.

فإذا فرضنا أن ABC يمثل المقطع الأساسي لمنشور ثلاثي من الزجاج زاوية رأسه A و أن شعاعا ضوئيا DE يسقط على الوجه AC فانه ينكسر داخل المنشور مقتربا من العمود (في الاتجاه EF)

ثم يخرج من الوجه AB في الاتجاه FG كمل بالشكل.

من هذا الشكل يتضح أن الشعاع DE يعانى انحراف كل من النقطتين E و F و أن الانحراف الكلى في اتجاه DE يقدر بقيمة الزاوية بين امتداد الشعاعينDE و GF .



فإذا كانت الزوايا θ و φ و φ1 وθ1 تمثل زوايا السقوط و الانكسار عند النقطتين E و F فان:

$$\theta = M\hat{E}F + \phi \therefore \; M\hat{E}F = \theta - \phi \quad (18)$$

$$\theta_1 = M\hat{F}E + \phi_1 \therefore \; M\hat{F}E = \theta_1 - \phi_1 \quad (19)$$

و زاوية الانحراف α تعطى من

$$\alpha = M\hat{E}F + M\hat{F}E$$

$$\therefore \quad \alpha = \theta + \theta_1 - (\phi + \phi_1) \quad (20)$$

في الشكل الرباعي AELF نجد أن

$$\Theta \qquad A\hat{E}L + A\hat{F}L = 180^\circ$$

$$\therefore \qquad \hat{A} + F\hat{L}E = 180^\circ \quad (21)$$

من المثلث FEL نجد أن

$$\phi + \phi_1 + F\hat{L}E = 180^\circ$$

بالتعويض من المعادلة (21) في المعادلة السابقة نحصل على:

$$\hat{A} = \phi + \phi_1 \quad (22)$$

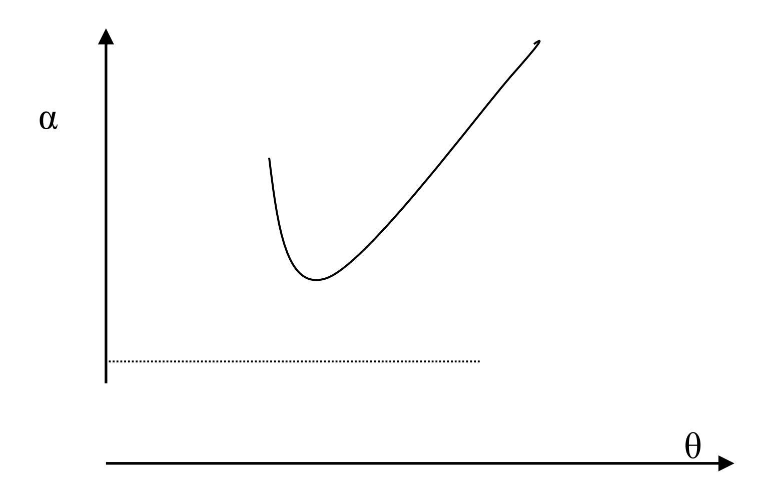
من المعادلتين (20) و (22) نجد أن

$$\alpha = \theta + \theta_1 - \hat{A} \quad (23)$$

و حيث أن A زاوية رأس المنشور تكون ثابتة لا تتغير إلا بتغير المنشور، فان زاوية الانحراف α تتوقف على زاويتي السقوط و الخروج..

النهاية الصغرى لزاوية الانحراف:-

ذكرنا في المعادلة السابقة أن زاوية الانحراف تتغير تبعا لتغير زاويتى السقوط و الخروج، فإذا رسمت العلاقة بين زاوية الانحراف وزاوية السقوط فسوف يكون لها سلوك كالمماثل بالشكل



ونلاحظ أنه كلما ذادت زاوية السقوط قلت زاوية الانحراف حتى تصل إلى أقل قيمة لها ثم تأخذ بعدها في الزيادة مرة أخرى، و معنى هذا أن هناك قيمة لزاوية السقوط تكون عندها زاوية الانحراف اقل ما يمكن وتسمى النهاية الصغرى لزاوية الانحراف ورياضيا يعنى هذا أن:

$$\frac{d\alpha}{d\theta} = zero$$

بتفاضل المعادلة (23) بالنسبة ل θ

$$\frac{d\alpha}{d\theta} = 1 + \frac{d\theta_1}{d\theta} \quad (24)$$

و عند وضع النهاية الصغرى للانحراف يكون

$$\frac{d\theta_1}{d\theta} + 1 = 0 \quad (25)$$

و بتفاضل المعادلة (22) نحصل على

$$\frac{d\phi}{d\theta} + \frac{d\phi_1}{d\theta} = 0 \quad (26)$$

فإذا كان μ معامل انكسار مادة المنشور فان

$$\frac{\sin(\theta)}{\sin(\phi)} = \mu \qquad , \quad \frac{\sin(\theta_1)}{\sin(\phi_1)} = \mu \quad (*)$$

$$\therefore \quad \sin(\theta) = \mu \sin(\phi)$$

$$\therefore \quad \cos(\theta) = \mu \cos(\phi)\frac{d\phi}{d\theta} \quad \frac{d\phi}{d\theta} = \frac{\cos(\theta)}{\mu\cos(\phi)} \quad (27)$$

بالمثل يمكننا الحصول على

$$\frac{d\phi_1}{d\theta_1} = \frac{\cos(\theta_1)}{\mu\cos(\phi_1)} \quad (28)$$

بالتعويض من (27) في (26)

$$\frac{\cos(\theta)}{\mu\cos(\phi)} + \frac{d\phi_1}{d\theta} = 0 \quad (29)$$

و حيث أن

$$\frac{d\phi_1}{d\theta} = \frac{d\phi_1}{d\theta_1} \cdot \frac{d\theta_1}{d\theta} \quad (30)$$

بالتعويض من (28) و (29) في (30) نحصل على

$$\frac{\cos(\theta_1)}{\mu\cos(\phi_1)}\cdot\frac{d\theta_1}{d\theta}+\frac{\cos(\theta)}{\mu\cos(\phi)}=0 \qquad (31)$$

بالتعويض من (25) في (31)

$$\frac{\cos(\theta)}{\cos(\phi)}=\frac{\cos(\theta_1)}{\cos(\phi_1)} \qquad (32)$$

و من قوانين حساب المثلثات يمكننا كتابة هذه المعادلة على الصورة الآتية

$$\frac{1-\sin^2(\theta)}{1-\sin^2(\phi)}=\frac{1-\sin^2(\theta_1)}{1-\sin^2(\phi_1)} \qquad (33)$$

و بالتعويض من المعادلة (*) في المعادلة السابقة نحصل على

$$\frac{1-\sin^2(\theta)}{1-\frac{\sin^2(\theta)}{\mu^2}}=\frac{1-\sin^2(\theta_1)}{1-\frac{\sin^2(\theta_1)}{\mu^2}} \qquad (34)$$

و هذه المعادلة تأخذ الشكل الاتى

$$\left(\sin^2(\theta) - \sin^2(\theta_1)\right)(\mu^2 - 1) = 0 \quad (35)$$

و حيث أن $\mu \neq 1$ ،فان

$$\theta = \theta_1 \quad (36)$$

و بالمثل يمكننا استنتاج أن

$$\phi = \phi_1 \quad (37)$$

أي أنه عند وضع النهاية الصغرى للانحراف زاوية السقوط = زاوية الخروج.

و بالتالي زاوية رأس المنشور(المعادلة 22) تأخذ الشكل:

$$A = 2\phi \quad (38)$$

و المعادلة (23) تأخذ الشكل:

$$\alpha + A = 2\theta$$

و المعادلة (*) يمكن أن تكتب على الصورة:

$$\mu = \frac{\sin(\frac{\alpha + A)}{2})}{\sin(\frac{A}{2})} \quad (39)$$

أما إذا كانت زاوية رأس المنشور صغيرة و كانت الأشعة الساقطة على سطح المنشور عمودية تقريبا فان زوايا الانكسار و الانحراف تكون صغيرة كذلك، و من ثم تأخذ المعادلة السابقة الشكل الآتي

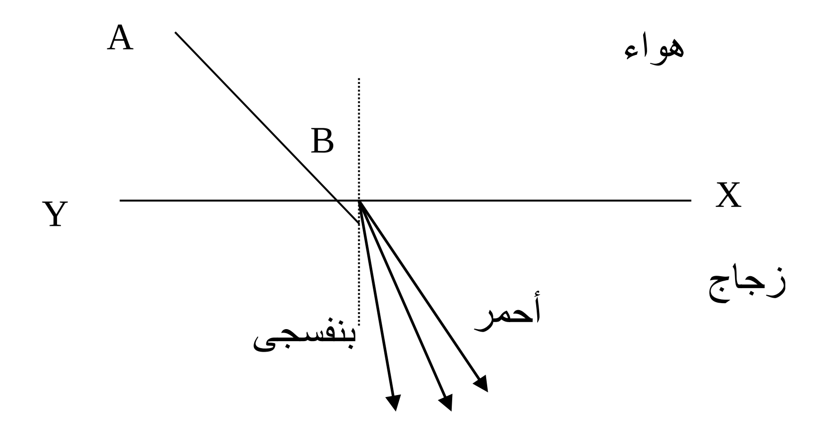
$$\mu = \frac{(\frac{\alpha + A)}{2})}{(\frac{A}{2})}$$

$$\therefore \quad \mu = 1 + \frac{\alpha}{A}$$

$$\therefore \quad \alpha = A(\mu - 1) \quad \textbf{(40)}$$

تفريق الضوء بالانكسار

تعتبر ظاهرة تفريق الضوء أحدى الظواهر المهمة و التي تفسر من خلال الضوء الهندسي. فإذا فرضنا أن AB يمثل شعاعا ضوئيا يسقط من الهواء على سطح مستوى يقصل بين الهواء و وسط آخر كالزجاج فان الشعاع المنكسر في الزجاج يعانى تفريقا أو تحليلا إلى الأشعة المكونة له. و تسمى هذه الظاهرة التفرق اللوني أو التشتت اللوني، و هي تنتج من اختلاف معامل الانكسار بالنسبة للون الضوء.



وتسمى مجموعة الألوان الناتجة من عملية تشتت الضوء الأبيض - الأحمر، البرتقالي، الأصفر، الأخضر، الأزرق، النيلي، البنفسجي - بالطيف كما يسمى الفرق بين زاويتي انحراف أي لونين بالتفريق الزاوي لهذين اللونين. وتتوقف هذه الزاوية على طبيعة الوسط الذي يحدث فيه الانكسار.

ويزداد التفريق الزاوي في حالة المنشور و ذلك نتيجة انحراف الأشعة عند كلا من سطحي المنشور.

قوة التفريق

سبق وأن أشرنا أن زاوية الانحراف للمنشور تعطى من العلاقة الآتية:

$$\alpha = A(\mu - 1)$$

فإذا كانت زاوية انحراف اللون البنفسجي α_V ، و زاوية انحراف اللون الأحمر هي α_R

فان: $\alpha_V = A(\mu_V - 1)$ $\alpha_R = A(\mu_R - 1)$

حيث μ_V و μ_R هما معاملا انكسار الأشعة البنفسجية والحمراء في مادة المنشور. أي أن التفريق الزاوي للونين البنفسجي والأحمر يعطى من المعادلة الآتية:

$$\alpha_V - \alpha_R = A(\mu_V - \mu_R) \quad (41)$$

و تعرف قوة تفريق المنشور من المعادلة

$$F = \frac{\alpha_V - \alpha_R}{\alpha} \quad (42)$$

حيث α زاوية الانحراف بالنسبة للون الأوسط في الفيض.

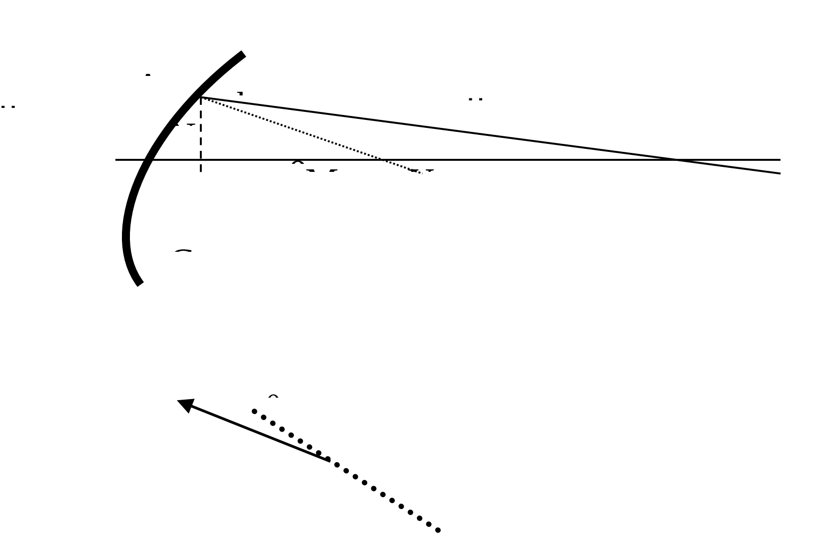
فإذا كانت μ متوسط معامل الانكسار للونين البنفسجى و الأحمر، فان قوة تفريق المنشور للضوء تعطى من العلاقة:

$$F = \frac{\mu_V - \mu_R}{\mu - 1} \quad (43)$$

يتضح من المعادلتين (41) و (43) أنه بينما يتوقف التشتيت الزاوى على زاوية رأس المنشور و على طبيعة المادة المصنوع منها فان قوة التشتيت تتوقف فقط على طبيعة المادة المصنوع منها المنشور.

الانكسار عند الأسطح الكرية

نفرض أن X نقطة مضيئة على المحور الأساسي لمرآة مقعرة ABC تفصل بين وسطين معامل انكسار الضوء فيهما μ1 و μ2 و ليكنM مركز تكور السطح الكرى.



فإذا فرضنا أن μ2 > μ1 فان الشعاع الساقط XA ينكسر في الاتجاه /AY ، و إذا مددنا هذا الشعاع المنكسر فانه سوف يتقاطع مع محور المرآة في النقطةY التي تمثل صورة الجسم، كما هو موضح بالشكل الآتي.

و من هذا الشكل يتضح أن

$$\hat{\beta} = \hat{\gamma} + \hat{\theta}$$

$$\therefore \qquad \hat{\theta} = \hat{\beta} - \hat{\gamma} \quad \text{(44)}$$

أيضا

$$\hat{\beta} = \hat{\alpha} + \hat{b}$$

$$\therefore \qquad \hat{b} = \hat{\beta} - \hat{\alpha} \quad \text{(45)}$$

و حيث أن

$$\frac{\sin(b)}{\sin(\theta)} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$

فإذا كانت النقطة A قريبة من قطب المرآة فأن كل من زاويتى السقوط و الانكسار تكونان صغيرتين

$$\therefore \qquad \frac{\hat{b}}{\hat{\theta}} = \frac{\mu_2}{\mu_1}$$

$$\therefore \qquad \mu_1 \hat{b} = \mu_2 \hat{\theta} \quad (46)$$

بالتعويض من (44) و (45) في (46) نحصل على

$$\mu_1 (\beta - \alpha) = \mu_2 (\beta - \gamma) \quad (47)$$

فإذا كانت المسافة بين الجسم و الصورة و المركز عن قطب المرآة هي r,y, x على الترتيب، فان

$$\alpha = \frac{N}{x} \quad , \gamma = \frac{N}{y} \quad , \quad \beta = \frac{N}{r} \quad (*)$$

بالتعويض من هذه المعادلة في المعادلة (47)

$$\mu_1 \left(\frac{N}{r} - \frac{N}{x} \right) = \mu_2 \left(\frac{N}{r} - \frac{N}{y} \right)$$

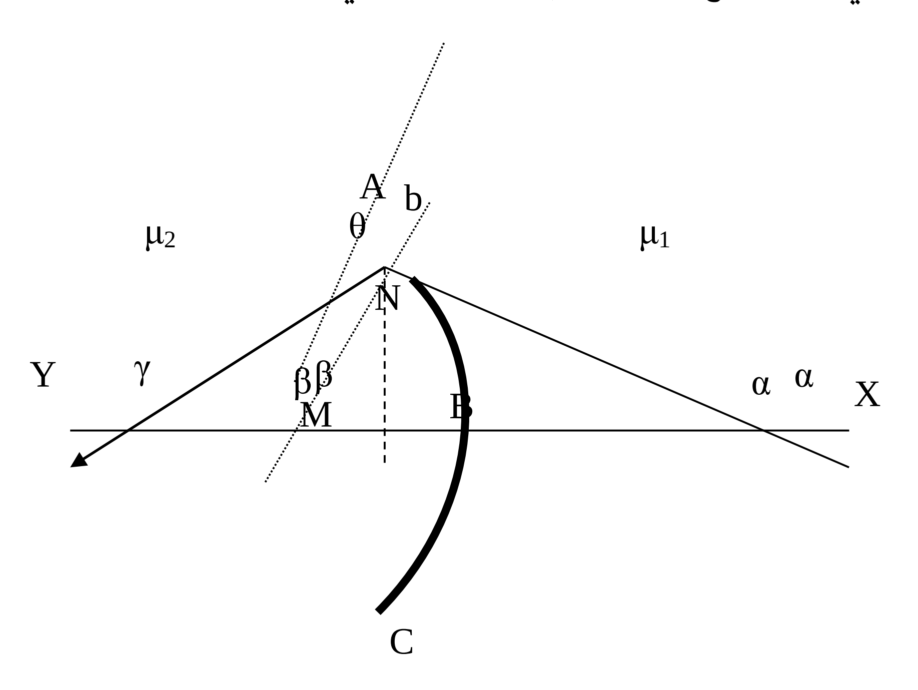
ووفقا لقاعدة الإشارات التي سبق ذكرها فان:

$$\mu_1 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{x} \right) = \mu_2 \left(\frac{1}{r} - \frac{1}{y} \right)$$

$$\therefore \qquad \frac{1}{r}\left(\mu_2-\mu_1\right)=\frac{\mu_1}{x}-\frac{\mu_2}{y} \qquad (48)$$

و هي المعادلة العامة في حالة السطح الكرى المقعر.

أما في حالة السطح الكرى المحدب (كما بالشكل الآتي) فان



$$\hat{\beta} = \hat{\theta} + \hat{\gamma}$$

$$\therefore \qquad \hat{\theta} = \hat{\beta} - \hat{\gamma} \qquad \textbf{(49)}$$

أيضا

$$\hat{b} = \hat{\beta} + \hat{\alpha} \qquad \textbf{(50)}$$

و من المعادلات (46) و (49) و (50) يمكننا الحصول على

$$\mu_1 (\alpha + \beta) = \mu_2 (\beta - \gamma) \qquad \textbf{(51)}$$

و بكتابة المعادلة (*) مرة أخر و لكن مع مراعاة قاعدة الإشارات في هذه الحالة

$$\alpha = \frac{N}{x} \quad , \quad \beta = -\frac{N}{r} \quad , \quad \gamma = -\frac{N}{y}$$

فان المعادلة (51) تأخذ الشكل الآتي

$$\mu_1 \left(\frac{1}{x} - \frac{1}{r} \right) = \mu_2 \left(\frac{1}{y} - \frac{1}{r} \right) \qquad \textbf{(52)}$$

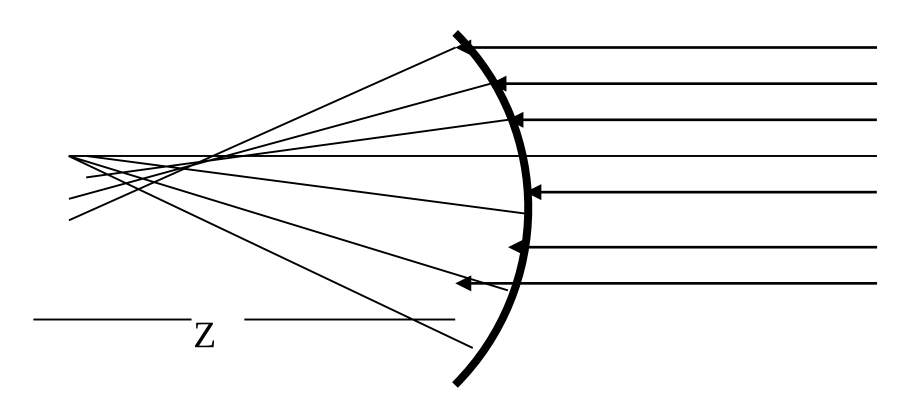
$$\therefore \quad \frac{1}{r}\left(\mu_1 - \mu_2\right) = \frac{\mu_1}{x} - \frac{\mu_2}{y} \qquad (53)$$

و هي نفس النتيجة التي حصلنا عليها في حالة السطح الكرى المقعر.

أما إذا كانت الأشعة الساقطة متوازية كما بالشكل الآتي (أى أن X في ∞) فان المعادلة السابقة تصبح على الصورة الآتية

$$y = \frac{r\,\mu_2}{\mu_2 - \mu_1} \qquad (54)$$

و بذلك تتجمع الأشعة المنكسرة في نقطة واحدة Z تسمى البؤرة و يسمى بعدها عن قطب المرآة البعد البؤرى.



الفصل السابع

أنماط فن الخداع البصري وأثره على مفهوم الإبهار المرئي عند الشباب العربي

قامت سنّة هذا الكون على أسس وقوانين سنّها الخالق سبحانه و تعالى بحكمته البالغة،فكان قانون الأسباب والمسببات كمثابة الحجّة التي أقامها الله سبحانه وتعالى على عباده أن لا يتبعوا أيّة خرافة تتسلل إلى عقولهم فتعطلها عن التفكير السوّي الصحيح وتبعدها عن معرفة وحدانية الله حق معرفة فلهذا كان موقف الإسلام من بعض الطقوس والمعتقدات موقفا حاسما، فقد يعتقد البعض ان فن الخداع البصري optical art illusion يعتمد على نوع من السحر وان كان هناك نوع من السحر فيه فهو سحر التخيل imagination magic ﴿ﭑ ٹ ٺ ٿ ٿ ٹ ٺ ٿ ٿ ٹ ٺ ڈ ڈ﴾ [سورة طه: الآية 66]

ومعنى سحر التخيل او الخداع البصري اصطلاحا هو ذلك الفعل الذي يصوّر للناظر دائما الصورة المرئية على غير حقيقتها حيث تكون الرؤية خادعة أو مضللة، ومبنى هذا على أن القوة الباصرة قد ترى الشيء على خلاف ما هو عليه في الحقيقة لبعض الأسباب العارضة والتفسير العلمي

لذلك أنّ المعلومات التي تجمعها العين المجردة وبعد معالجتها بواسطة الدماغ تعطي نتيجة لا تطابق المصدر أو العنصر المرئي فالخدع البصرية إذا هي صور و مشاهد مصنوعة مسبقا بطريقة مدروسة لتظهر للناظر بطريقة معيّنة و هي ليست كذلك كونها ضرب من التمويه و الحيلة

قال الله سبحانه و تعالى:

قَالَ أَلْقُوا ۖ فَلَمَّا أَلْقَوْا سَحَرُوا أَعْيُنَ النَّاسِ وَاسْتَرْهَبُوهُمْ وَجَاءُوا بِسِحْرٍ عَظِيمٍ [سورة الأعراف: الآية 116]

فقد خصّ الأعين دون غيرها من الأعضاء الجسدية الأخرى وخصّ البصر دون غيره من الحواس، وهذا ما يوافق التعريف العلمي للخدعة البصرية من حيث أنّها فعل يخدع كليّة النظام البصري للمشاهد بدءاً من العين حتى الدماغ، أي أنّ الخدعة تنطلق أولا من العين حتى تصل الإدراك العقلي فيخيّل للمشاهد أشياء مخالفة لما هي عليه في الواقع، ولهذا جائت الإشارة القرآنية إلى الأعين دون غيرها من الحواس الأخرى.

ويعتمد فن الخداع البصري Optical art illusion على استخدام القوانين الرياضيه لابداع لوحات تشكيليه توحى بالقيم الجماليه المتمثله في الحركه والسكون والعمق وبروز اللوحه بالرغم من انها على سطح مسطح .

نحن نرى في الطبيعه من حولنا اشكال متنوعه من الخداع البصرى المتمثل في العديد من الظواهر الطبيعيه كظاهرة السراب التي تحدث بسبب الاختلاف في كثافة طبقات الهواء القريبة من سطح الارض وتتمثل ظاهرة السراب فيما يشاهده المسافر في الصحراء وفي المناطق القطبية أثناء النهار من وجود بقع مائيه على الطريق او رؤيه صور مقلوبة للأشياء كالاشجار والحيوانات

وَالَّذِينَ كَفَرُوا أَعْمَالُهُمْ كَسَرَابٍ بِقِيعَةٍ يَحْسَبُهُ الظَّمْآنُ مَاءً حَتَّىٰ إِذَا جَاءَهُ لَمْ يَجِدْهُ شَيْئًا وَوَجَدَ اللَّهَ عِندَهُ فَوَفَّاهُ حِسَابَهُ ۗ وَاللَّهُ سَرِيعُ الْحِسَابِ [سورة النور: الآية 39]

ونرى في الطبيعه شكل اخر من اشكال الخداع البصري الموجود على جلود الحيوانات كالنمر والحمار الوحشى مثلا فالخداع البصري حولنا في كل مكان .

مشكله البحث :

ما مدى تأثير فن الخداع البصري optical art illusionعلى الشباب العربي وما مدى الاستفادة منه عربيا في مواكبه المشهد العالمى المعاصر.

أهداف البحث :

توضيح أهم المفاهيم الفكرية لفن الخداع البصري وأثرها على مفهوم الإبهار المرئي عند الشباب العربي.

توضيح مفهوم فن الخداع البصري optical art illusion.

الكشف عن مدى مساهمه فن الخداع البصريoptical art illusion والألعاب البصريةoptical toys في نشأة التصوير الفوتوغرافي و الأفلام المتحركة.

توضيح أن أساس فن الخداع البصري هو أساس رياضي بحت .

أسئلة البحث :

من هو مؤسس فن الخداع البصري optical art illusion ؟

ما هي أهم المفاهيم الفكرية لفن الخداع البصري optical art illusion ؟

كيف يمكن أن يكون لفن الخداع البصريoptical art illusion أثر سلبي على الهوية الثقافية ؟

كيف ساهم فن الخداع البصريoptical art illusion في التطور العلمي العالمي؟

منهج البحث :

يقوم البحث على المنهج التجريبى (اقامه معرض أثناء مناقشه البحث يضم تجارب تطبيقيه لفن الخداع البصريoptical art illusion) والوصفى والتحليلى لفن الخداع البصرى.

حدود البحث :

الحدود الزمانيه النصف الثانى من القرن العشرين

الحدود المكانيه الدول الاوروبيه والعربيه

أهميه البحث :

تعود أهمية البحث في الكشف عن أهمية فن الخداع البصري optical art illusionحيثي جمع بين العلم والفن في بنائه على أسس رياضية ومدى تطور هذا الفن عبر القرون الطويلة من البحث والتجريب و كيف مهد الطريق لظهور الفنون الرقمية التي أبهرت العالم بما فيها من تقنيات بصرية مدهشة وكيف ان الخداع البصري يمثل تحدى عالمى للشباب العربي

مصطلحات البحث :

فن الخداع البصري optical art illusion .

علم الحركه kinematics .

فن الانامورفسيس Anamorphoses art .

قانون الانعكاس The Law of Reflection .

فن الخداع البصريoptical art illusion:

الخداع : يقصد به في اللغة : "إ ظهار شئ خلاف المخفي ، ويقصد به أيضا الحيلة ".

أما مدرسة الخداع البصري فهي مكونة من شقين optical وتعني بصري و art وتعنى فن والمعنى الإجمالي يعني الفن البصري ولكن الشائع هو فن الخداع البصري (1) .

فهو ذلك الفعل الذي يجعل الأشياء أو الأشكال أو الألوان ترى أو تدرك بطريقة كاذبة و مغايرة لماهيتها الأصلية و بخلاف حالتها الطبيعية بإستخدام أسس وقواعد رياضية سمى الفن البصري بهذا الاسم لاعتماده على الخصائص البصريه الخاصه بالعين .

1- سماهر بنت عبد الرحمن فلاته : فن الخداع البصر بوإمكانيه إستحداث تصميمات جديده للحلى المعدنيه - جامعة الملك سعود- المملكه العربيه السعوديه -2008 ص6

علم الحركه kinematics :

هو أحد فروع علم الميكانيك الذي يصف مفهوم الحركة الفيزيائي للأجسام بدون أى إعتبار للكتل أو القوى التي تسبب الحركة2

فن الانامورفسيس Anamorphoses:

هو إعادة صياغة التكوين التشكيلى برؤية منظورية من خلال المفهوم الرياضى للنسب التشكيلية وتحويلها الى تكوين غير منتظم في الخطوط والاتجاهات ويمكن رؤيتها رؤية واقعية من خلال إنعكاسها على السطح المصقول وأشكالة وخاماته المختلفة أو رؤيتها من زاوية معينة على بعد معين.

قانون الانعكاس The Law of Reflection .

القانون الأول :- زاوية السقوط = زاوية الانعكاس.

القانون الثانى :- الشعاع الضوئى الساقط والشعاع الضوئى المنعكس والعمود المقام من نقطة السطح العاكس تقع جميعها في مستوى واحد عمودى على السطح العاكس وأن الشعاع الضوئى الذى يسقط عموديًا على السطح العاكس ينعكس على نفسه لأن كلا من زاويتى السقوط والانعكاس تساوى صفرًا .

الدراسة

فن الخداع البصري Optical art illusion من الفنون التي تمثل الإتجاهات الفنية الحديثة التي ظهرت في بداية الخمسينات من القرن العشرين وقد تمثل فناني هذا الإتجاه علم الحركة kinematics وعلم البصريات ونتائج نظرية الجشتالت مما أدى إلى إنعكاس مفاهيم هذا الإتجاه على الكثير من مجالات الفنون كالتصوير والنحت حيث ظهر العديد من الفنانين الرواد لهذا الإتجاه مثل فيكتور فازاريلىVictor Vasarely وكونشيلر ايشر M. C. Escher و جوزيف انتونىJoseph Antoine فإن هؤلاء الفنانين البصريين optical artists إستخدموا أنواعا مختلفه من الظواهر المرئيه التي تحدث بصورة مستمرة في مدركاتنا اليوميه غير أنها عاده تغفل أو تهمل ولا تدرك وتظهر براعتهم في جعل هذه الظواهر المهمله واضحه أمامنا بشكل ساطع فيما قدموه من لوحات مرسومه وأعمال فنيه متحركه

بحيث يوحى الشكل العام بالحركه مع انه ساكنلقد كان السعى الدؤوب لدى الفنانين لتفعيل المدرك الحسى لدى المشاهد عن طريق تحقيق أكبرقدرة ممكنة من حالات الدهشة والتأمل في التكوين التشكيلى .

لاحت ملامح هذا الفن منذ أواخر العشرينات وبداية الثلاثينات من القرن العشرين حيث ظهرت جذوره العميقة في مدرسة "الباوهاوس"(3)

حين قام مجموعة من أعضاء تلك المدرسة بإجراء عدةبحوث في الظاهرة البصرية ثم ظهرت في الأربعينات من القرن العشرين بعضا من النماذج المتفرقة لفن الخداع البصري.

لكنه لم يصبح فنا في مصاف الفنون الحديثة إلا مع حلولأوائل الخمسينات حين ظهر هذا الفن كظاهرة صحفية عندما أطلق عليه أحد الصحفيين الأمريكان تعبيرا صار شائعا وهو"أُوب- أرت "(Op Art) أو الفن البصري (Optical Art)

3- مدرسة الباوهاوس تأسست في المانيا وقد اسسها المعماري الفنان (والترجريبيوس)..وضمت إليها مجموعة من الفنانين والحرفيين والمصممين في مسعى منهلخلق تواصل بين الشكل والوظيفة وكانت هذه المدرسة الفنية نموذجا رفيعاودقيقا للفن والابداع

بعد أن قام بعض من الفنانين بإقامة معرض تحت عنوان "العيون المستجيبة" ومنذ ذلك الوقت أصبح فن الخداع البصري ممثلا لاحد الاتجاهات الفنية الحديثة وكان ذلك على يد مؤسسه الفنان فيكتور فازاريلى Victor Vasarely(4)

ومع ذلك فإن فن الخداع البصري Optical art illusion لم يكن ليظهر فجأة على يد مجموعه من الفنانين بل انه يعتبر تطورا للإتجاه التجريدى الذى يعتبر بمثابة منشأ العديد من الاتجاهات الفنية الحديثة في اعتماده على قيم جماليه مختلفه كالاتزان والايقاع والتضاد والعمق .

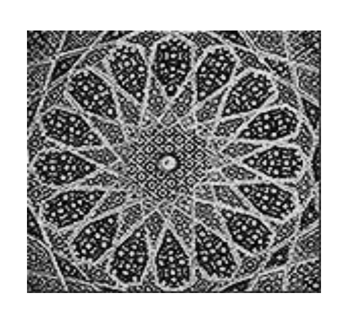
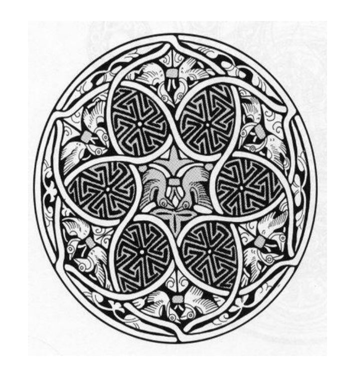
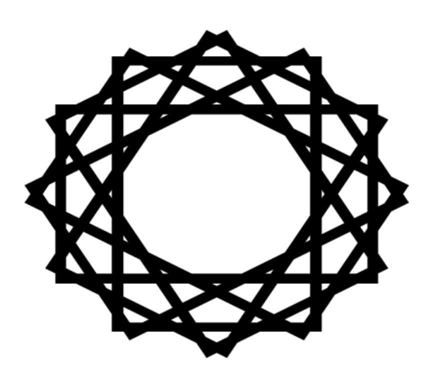
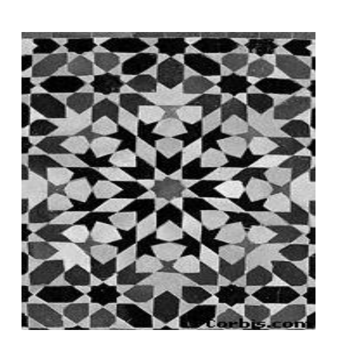
فن الخداع البصرى دليل على أن العلم والفنعلى مر التاريخ صنوان متلازمان وكل يمد الأخر بالتنوير لقد استطاع الفنان من خلال التفكير العلمى وبدلالات الإدراك أن يلخص أفكاره ويوطد مدركاته ، وبالإستناد على بعض الأفكار العلمية والنظريات الفراغية ، وبعض المفاهيم العلمية مثل استقامة خط بدءًا من تتابع نقطة ، قد أوضحت للفنان كيف يصوغ فكرة في محتوى يمكن استيعابه وإدراكه ،

4- سماهر بنت عبد الرحمن فلاته : فن الخداع البصرى وإمكانيه إستحداث تصميمات جديده للحلى المعدنيه - جامعة الملك سعود- المملكه العربيه السعوديه -2008- ص15

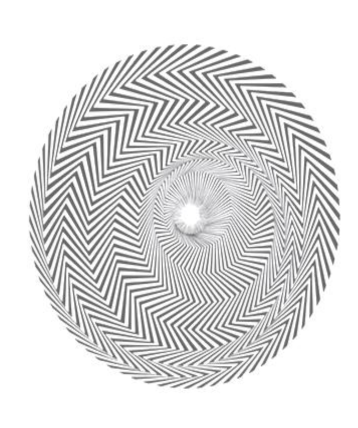
بل قد أهدى العلم للفنان أدوات الفكر ،وأدوات الصياغة الفنية ، ولكن تظل الأداة وسيلة وليست غاية .

ان حاجة الفنان إلى إبداع أعمال من شأنها أن تحقق قيمًا ثقافية مهمة ليس فقط في محتوىالعمل بل في البناء التشكيلى فقد اعتنى فنانو العصور القديمه المختلفه عناية دقيقة بالعالم المدرك حسيًا وبالحقائق الحسية فقد أبدوًا اهتمامًا يالغا بمثل هذه العلاقات .

وقد ظهرت ملامح لهذا الفن منذ العصر الاسلامى ويبدو هذا واضحا في الزخارف الاسلاميه الهندسيه الشكل حيث استخدم الفنان المسلم القوانين الرياضيه لاخراج الزخرفه الاسلاميه بهذا الشكل المعقد التركيب حيث تظهر الخطوط متداخله معا باسلوب هندسي رياضى فلا يعرف بدايه الخط من نهايته مما يخدع العين و يجعلها تتحرك في جميع اجزاء اللوحه باحثه عن بدايته ونهايته .

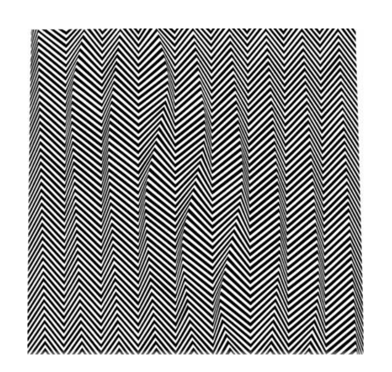
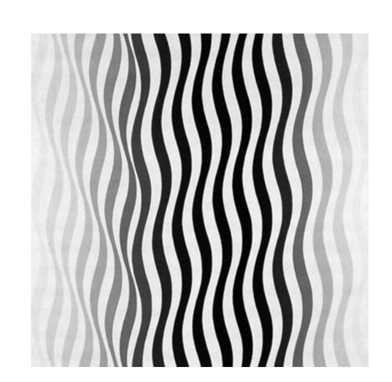
وتبعا لهذا فإن الاعمال المبكرة لفن الخداع البصريOPtical art illusion التي ظهرت في الستينات قد ساد فيها اللونان الابيض والاسود مما يضفي بعض المزايا فالتضاد بين الخطوط يصل الى اقصى مداه وبذلك تتعزز قيمه معظم التأثيرات البصريه المتداخله. (5)





5- نيكولاس ويد Nicolas wade_: الاوهام البصريه فنها وعلمها – العراق – بغداد - دار المأمون للترجمه والنشر -1988 - ص21

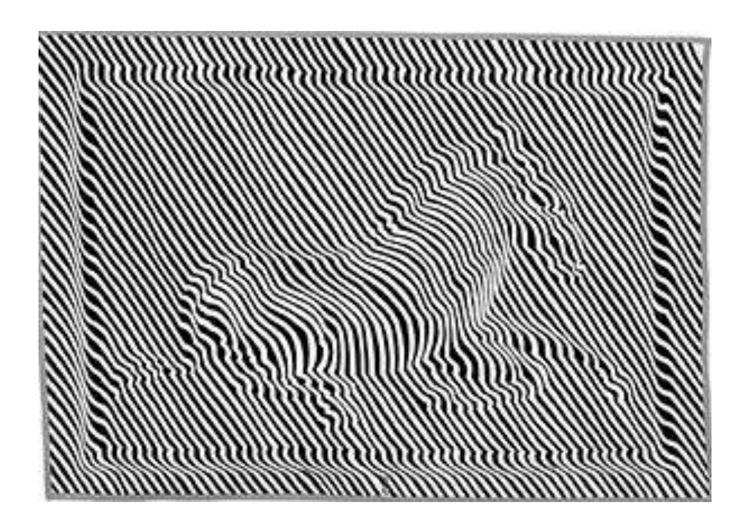
بلاز1(1962) مقاس 43×43بريز (1966) مقاس 117×82

أرست1(1965) مقاس70×68   ديسكسندنج (1965) المقاس 36×36

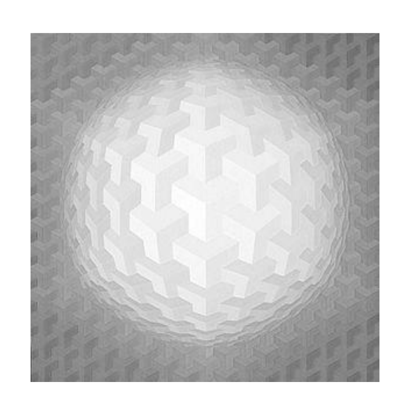
مجموعه من أعمال الفنانه برادجيت رايلى Bridget Riley باللونين الأبيض والأسود ويعتبر الفنان فيكتور فازاريلىVictor Vasarely هو المؤسس الاول لهذه المدرسه (مدرسه الخداع البصرى) optical artفهو اول من قدم اعمالا فنيه تدخل ضمن مصطلح optical art illusionاو الخداع البصرى

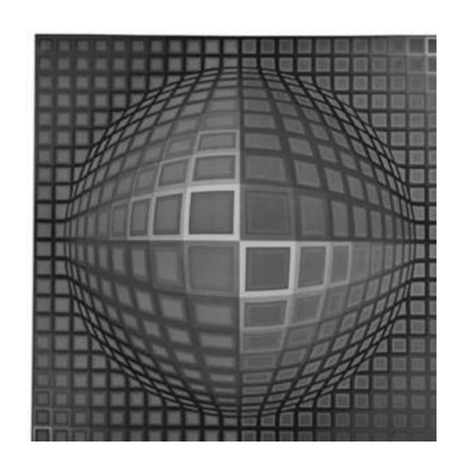
عمل فازاريلى Victor Vasarelyكفنان جرافيكي في الثلاثينيات عندما أبدع ما أُعتبر أول عمل في الخداعالبصري، وسماه Zebraزيبرا (أي الحمار المخطط) وكانت تتألف من خطوط متموجة سوداء وبيضاء، وقد أعطى ذلك العمل الاتجاه الذي تبعه فازاريليVictor Vasarely فعلى مدى العقدين التاليين طور ڤزاريلي Victor Vasarely من أسلوبه في الفن التجريدي الهندسي(6)



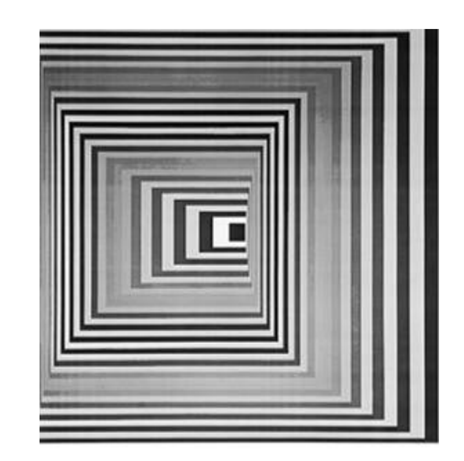
6- http://www.marefa.org/index.php/

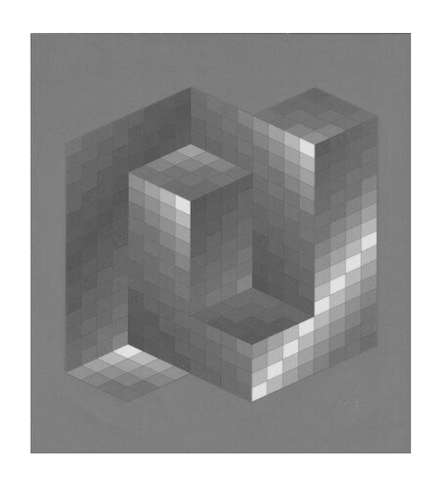
Zebra الحمار المخطط Victor Vasarelyفيكتور فازاريلى





فيكتور فازاريلى Victor Vasarelyقبعة ڤِگا(1979) أكريليك. فيكتور فازاريلى Victor Vasarely فيجا،





فيكتور فازاريلى **Victor Vasarely** فونال يكتور فازاريلى **Victor Vasarely**احمر وازرق

أنواع الخدع البصرية:

هناك أنواع عديدة من الخدع البصرية، وتتعدد بتعدد التقنية التي نستعملها للتحقيق الخدعة وهنالك أربع أنواع وهي.

خدع متعلقة بالألوان :

إن ّالعين البشرية ترى الألوان بشكل متغير على حسب المحيط، حيث أنه عند الرؤية إلى موضع معين نرى لون أو عدة ألوان ولكن ليست هذه هي الحقيقة

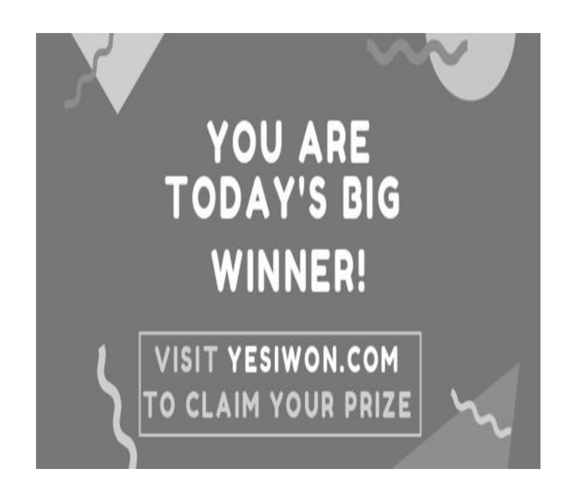


مربع الالوان المتباينةScintillating Grid

لو أردنا أن نحصي عدد النقاط السوداء في هذا المربع لإستعصى علينا ذلك، لأننا سنرى أنّ هذه النقاط السوداء تغدوا بيضاء مباشرة بعدما أن ننقل بصرنا إلى نقطة أخرى في المربع،و هكذا فلهذا يستحيل علينا تعدادها، و التفسير العلمي في ذلك أنّ هذه النقاط السوداء لا وجود لها أساسا داخل المربع!

ويمكن التأكد من صحة ذلك بتغطية أحد الاشرطه السوداء باليد. و يمكن تفسير ذلك بإعتبار أنّ العين البشرية عاجزة عن التنقل بين لونين متعاكسين بسبب التباين الشديد بينهما. فلقد خُدعت أبصارنا من جرّاء هذا التباين و شاهدنا ما لا يوجد أساسا. (7)

خدع متعلقة بالهندسة :



7- محمد ترياقى : مقاله "إعجاز الايات القرانيه في دحض الخدع البصرييه"

مثلث بانروزpenrose tringle

يدعى هذا الشكل بمثلث "بانروز" نسبة إلى عالم الرياضيات "روجر بانروز "الذي رسم هذا الشكل .إنّ هذا الشكل الهندسي لا يمكن تحقيقه إلاّ عن طريق الرسم على الورق ببعدين هندسين إثنين و يستحيل تجسيده في الواقع بثلاثة ابعاد، فهو شكل من أشكال الخدع الهندسية(8)

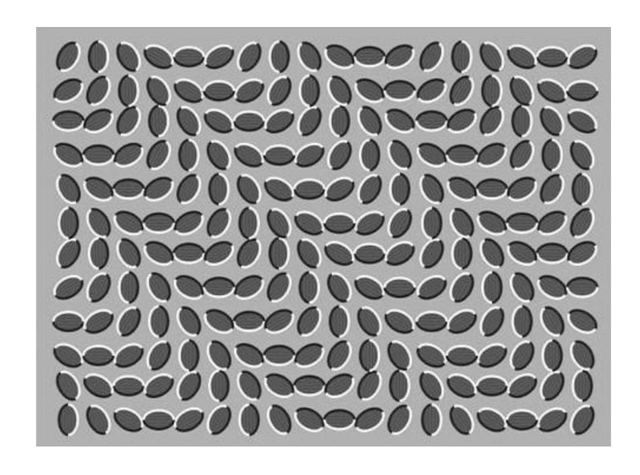
خدع متعلقة بتحريك الصور:



الصورة المتحركة Rotating Circles

8- المرجع السابق ذكره

لو قمنا بالتحديق في مركز الشكل التالي ثم قمنا بتحريك رؤوسنا إلى الأمام ثم إلى الخلف مرّات عديدة لشاهدنا أن الحلقتين تدوران الواحدة بعكس إتجاه الأخرى، غير أن الأمر ليس كذلك فالحلقتين ساكنتين و لا تدوران بأيّ إتجاه، و يمكنا التأكد من هذا بأن نعيد التجربة كاملة محدقين في الدائرتين دون المركز فسنرى أنهما فيسكون تام(9)



هذه الصورة قد تبدو متحركه مع انها ثابته

9- محمد ترياقى : مقاله "إعجاز الايات القرانيه في دحض الخدع البصريه"

خدع متعلقة بالأحجام و القياسات:

في الشكل التالي نرى أنّ الخط الذي يشكّل الرسم الذي على يسارنا(الشكل 1) أطول من الخط الذي يشكل الرسم الذي من جهة اليمين (الشكل 2)، غير أنّ الحقيقة عكس ذلك فالخطين متساوين تماما و يمكننا التحقق من ذلك بعملية القياس. إنّ الأسهم التي تحدّ طرفي القطعتين المستقيمتين توحي لأعيننا أنّ أحد القطعتين أطول من الأخرى، و هو تحليل خاطئ للدماغ ناتج عن الخداع البصري.



خدعة "ميلار ليار" .Illusion of Müller-Lyer

ولم تقتصر استفادة فن الخداع البصري opticalart على الاتجاه التجريدي فقط،بل أنه يعتبر امتداد او تطور الأساليب فنية عديدة ظهرت في فترات زمنية مختلفة جعلت منه فنا ذو مكانة رفيعة داخل الاتجاهات الفنية في القرن العشرين كأسلوب يمثل سمة العصر وطابعه مثل فن تشويه المنظور البصرى الانامورفسيس Anamorphoses

حيث يعتمد على الخداع البصرى من خلال رؤيه صورة مرئيه واضحه من مصدر مشوه باستخدام مراه عاكسه اسطوانيه او مخروطيه او هرميه الشكل -باستخدام قانون الانعكاس- ويطلق عليه فن الانامورفسيس. (10)



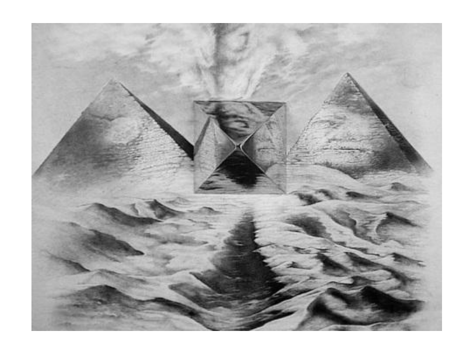


---

[10]- دكتور شـاكر عبد الحميد : الفنون البصـريه وعبقريه الادراك-القاهرة – الهيئه المصـريه العامه للكتاب-2008_ص373

خداع بصرى باستخدام مراه اسطوانيه الشكل





خداع بصرى باستخدام مراه مخروطيه الشكل خداع بصرى باستخدام مراه هرميه الشكل

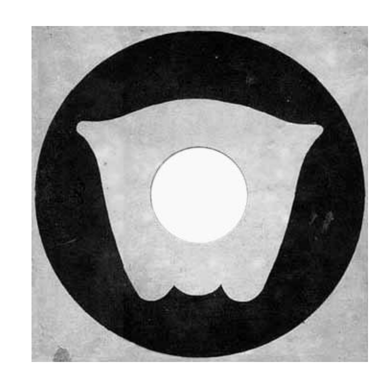
ويعتمد فن الانامورفسيسِ Anamorphoses artعلى تشويه المنظور بطريقه رياضيه مخصصه لنوع المرايا المستخدمة -أسطوانية او هرميه او مخروطيه -فكل مرايا لها طريقتها الخاصة في تشويه المنظور(11)

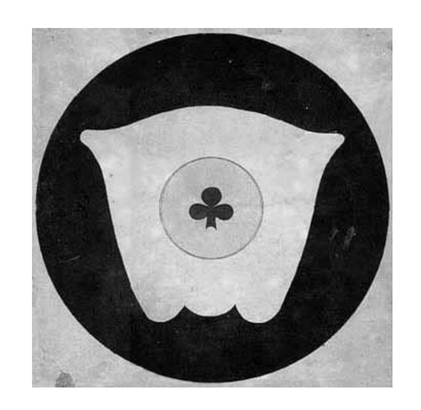
[1]1- Jurgis Baltrusaitis: Anamorphosis, in mary in abramans puplish New York,1974. P 151.





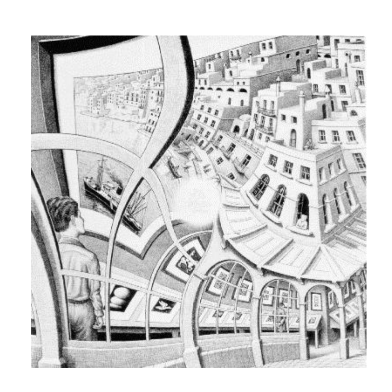
صورة مشوهه قبل وضع المراه الاسطوانية بعد وضع المراه الإسطوانيه

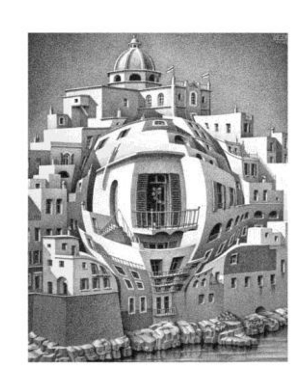




صورة مشوهه قبل وضع المراه المخروطيه الشكل بعد وضع المراه المخروطيه الشكل

وقد تخصص فنانون في دراسة تشويه المنظور أكثر حتى وصل إلى درجه كبيرة من الخداع البصري حيث قد تبدو بعض الصور مجسمه بطريقه غريبة وجديدة وقد تفرد الفنان كونشيلر ايشر m.c.escherفي هذا الاختصاص .





الخداع البصري يمثل تحدى للشباب العربي :

أن نوع التحديات التي تتعرض لها الأمة العربية وأبعادها هي المقدمة الضرورية لتحديد سبل مواجهتها فالعالم اليوم يتغير بسرعة مذهلة وبقدر التحديات الكبيرة التي أفرزتها هذه التغيرات توفرت فرص جديدة للانجاز ولما كان محور هذه التغيرات هو المعلومات والاتصال والثورة الرقمية فلابد من تكاتف الجهود للعمل على إدماج الشباب بعصر المعلومات. ولمواجهة تحديات العصر لابد من الاستعانة بجهود مشتركه بما تقتضيه المواجهة من تسلح بالإيمان والعلم ومواكبة التطور العلمي والتقني والانفتاح الواعي على الحضارة الإنسانية

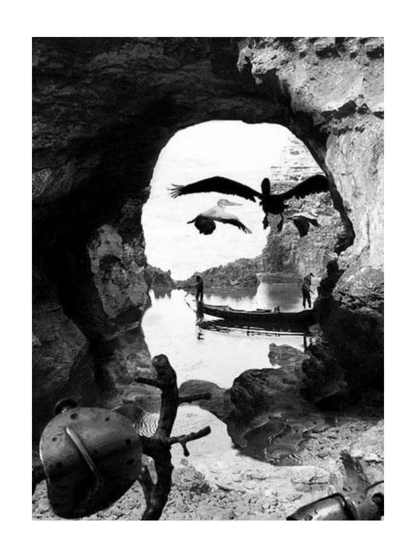
والتفاعل الايجابي معها وتحصين الهوية القومية للشباب العربي بما يمكنهم من الإسهام الخلاق في مسيرة التطور والتنمية وزيادة المناعة وتعزيز الوحدة الوطنية والقومية لفن الخداع البصري **Optical art** الأثر البالغ علي الإبهار المرئي عند الشباب العربي فقد اثري عقول الشباب العربي بالكثير من الحيل والطرق المؤدية للإمتاع البصري باستخدام صور وأشكال مختلفة من الخداع البصري مما مهد لهم الطريق للاستحداث رؤى فنيه إبداعية من مصادر بسيطة وابتكار مظاهر جماليه بصريه حديثه باستخدام التكنولوجيا والتقنية الحديثة.

فالعالم يعيش في حلم سريالي ناتج عن التطور التكنولوجي الذي اكتسح العالم بأسره، حيث لا يمر يوم لا نسمع فيه عن اختراع آلة تكنولوجية متطورة أو أكثر تطورا وذكاء من سابقاتها، مما أسهم بشكل كبير وفعال في تطور فن الخداع البصري **optical art illusion** باستخدام الكمبيوتر والأجهزة الحديثة والبرامج اليكترونية الخاصة بفن الخداع البصري.

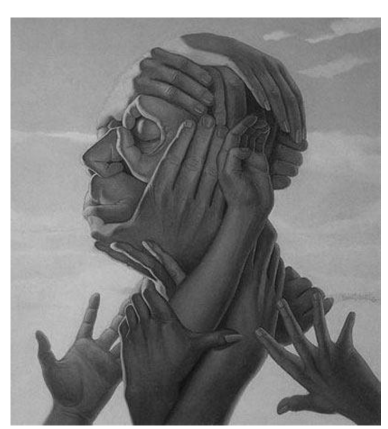
ولكن مع زيادة تقدم التقنيه والتكنولوجيا ووسائل الاتصالات تتلاشى تدريجيا الهوية الثقافية الخاصة بالبلاد وتزال الحدود بينها فلا يتضح الأسلوب العربي من الغربي ومن هنا يأتي دور الشباب العربي في المحافظة على الهوية العربية من ناحية ومواكبه التقدم التقني من ناحية أخرى وفتح المجال للتفكير في حيل ولوحات بصريه جديدة في مجالات الفنون المختلفة كالتصوير والنحت والرسم على الجدران والطرقات .













أشكال مختلفة من الخداع البصري باستخدام التقنية الحديثة

ملحقات البحث

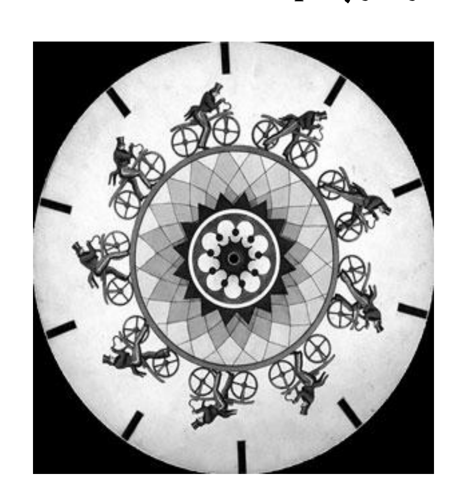
بعض الأجهزة والأدوات البسيطة التي ساهمت في تطور فن الخداع البصري قديماً





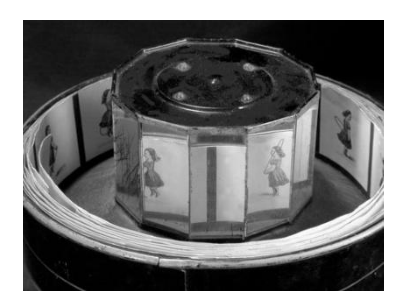
الثاومتروب Thaumatrope





الفيناكستوسكوبPhenakistoscope

زويتروب Zoetrope



براكسينوسكوب Praxinoscope

الانورثوسكوب Anorthoscope

وقد كانت هذه الاجهزة تستخدم قديما بغرض الترفيه والتسليه مع انها تعتبر اللبنه الاساسيه لاجهزة الفيديو والكاميرا مما جعل لها الفضل في نشاه فن الرسوم المتحركه animation art.

ومن هنا يتضح دور فن الخداع البصري optical art of illusion في التطور العلمي العالمي من خلال مساهمته في نشاه الفنون الرقميه digital arts

نتائج البحث :

فن الخداع البصري يعتبر امتدادا وتطور الأساليب فنية عديدة ظهرت في فترات زمنية مختلفة .

توظيف العلوم الرياضية في الفنون التشكيلية أبدع رؤية تشكيلية جديدة.

أن استخدام المنظور العلمي في الفن التشكيلي فتح الطريق لمزيد من الدراسات والأبحاث التي تؤكد أصالة العلاقة بين الفن والعلم.

الفهرس

قائمة المحتويات